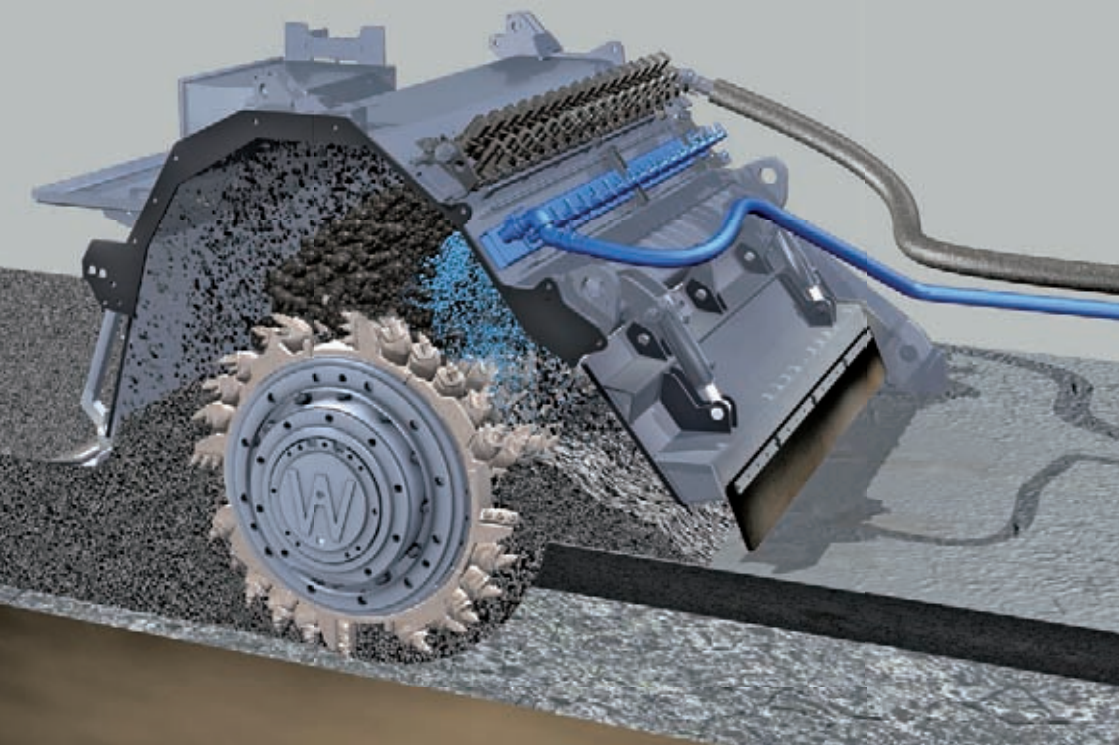
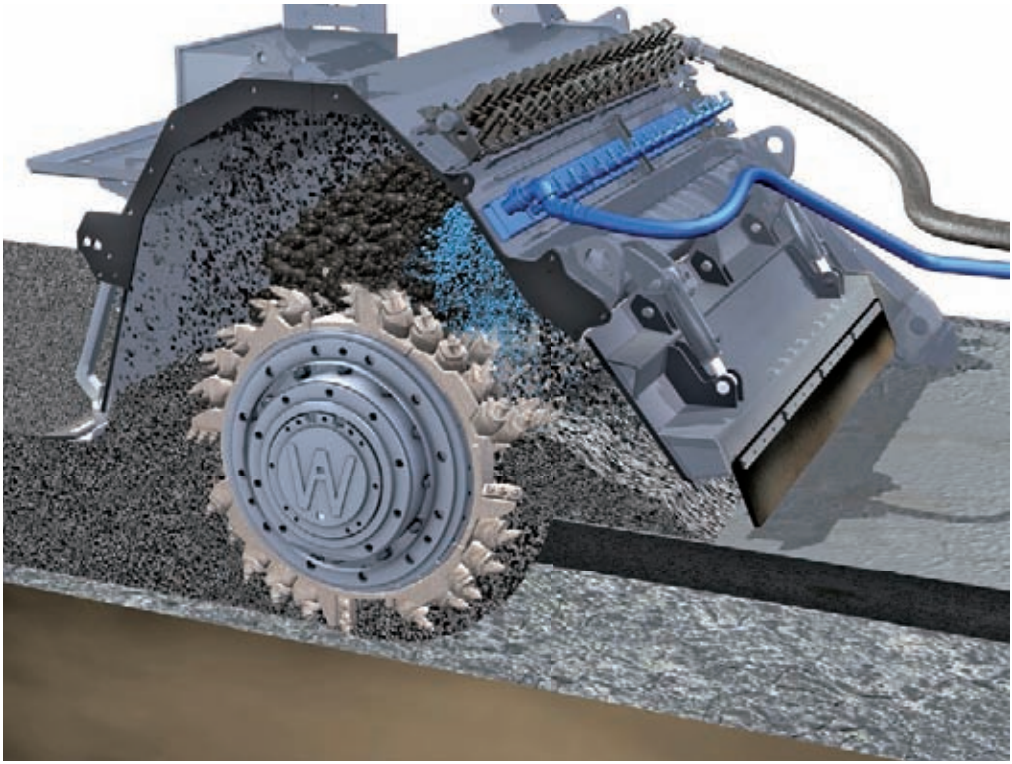
Reciclagem a frio

Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen





Wirtgen GmbH
Reinhard-Wirtgen-Strasse 2 · 53578 Windhagen · Alemanha

Fone: +49 (0) 26 45/131-0
Fax: +49 (0) 26 45/131-242

Primeira edição: 2012

Direitos autorais de Wirtgen GmbH 2012.
Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, armazenada em um sistema de busca nem transmitida em qualquer forma sem o consentimento prévio e por escrito da Wirtgen GmbH.

Agradecimentos

Esta primeira edição do manual Tecnologia de reciclagem a frio da Wirtgen foi elaborada por uma equipe de especialistas com ampla experiência em todos os aspectos da recuperação de pavimentos, principalmente nas questões relacionadas à reutilização de materiais de pavimentos de estradas existentes.

A equipe inclui engenheiros da Loudon International, que auxiliam a Wirtgen e seus clientes na aplicação da tecnologia de reciclagem a frio há quase vinte anos. Levando em consideração os avanços rápidos realizados na área especializada da engenharia de pavimentos, um grupo seleto de acadêmicos de algumas universidades renomadas foi convidado a participar da equipe, principalmente da Universidade de Stellenbosch. Suas contribuições valiosas podem ser evidenciadas por todo o manual, particularmente nos capítulos que tratam do projeto do pavimento e de agentes estabilizadores. Além disso, os engenheiros da Wirtgen GmbH forneceram uma orientação valiosa no tratamento dos pontos fracos do antecessor desta publicação, a Segunda edição do Manual de reciclagem a frio da Wirtgen. As preocupações anteriormente informadas por clientes e engenheiros de campo também foram contempladas por esta nova publicação.

A Wirtgen GmbH agradece a todos que contribuíram na elaboração deste manual e está aberta às opiniões de seus leitores. Qualquer comentário será bem recebido, independentemente da natureza das observações. Seus comentários podem ser encaminhados ao endereço info@wirtgen.de.

Prefácio

Nos últimos vinte anos, a Wirtgen tem liderado o desenvolvimento da tecnologia de reciclagem a frio. Ao longo desse tempo, tanto a tecnologia em si como as máquinas que realizam a obra de reciclagem evoluíram desde os primórdios até o patamar atual, onde a reciclagem a frio é reconhecida no mundo todo como o processo normal para a construção de camadas de pavimentos, principalmente na recuperação de pavimentos deteriorados.

A tecnologia de reciclagem a frio é atualmente empregada na construção de todos os tipos de pavimentos, desde vias de acesso secundário até rodovias com várias faixas de rodagem. Caso o pavimento se encontre deteriorado, sempre existe a opção de reciclar o material existente e colher os frutos em termos de custos de produção mais baixos, maior durabilidade (vida útil) e, o que é de igual importância, uma redução expressiva no impacto negativo que a obra terá sobre o meio ambiente.

O processo de reciclagem a frio tem sido usado com sucesso na recuperação e melhoria de milhares de quilômetros de estradas nos últimos vinte anos. A lista de obras em que as recicladoras da Wirtgen já foram empregadas no mundo todo é exaustiva e abrange todas as regiões climáticas em todos os continentes (exceto na Antártica, onde não existem estradas). Pavimentos tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento estão cada vez mais sendo reciclados como a solução às condições de deterioração de suas malhas viárias.

A experiência adquirida com esses projetos possibilitou que a Wirtgen tenha ativamente expandido as barreiras tecnológicas, investindo em pesquisa e desenvolvimento e experimentando novas ideias e conceitos (ex.: estabilização betuminosa). Esses desenvolvimentos geraram grandes benefícios ao setor global.

Esta 1ª edição da Tecnologia de reciclagem a frio da Wirtgen é uma coletânea de lições aprendidas nos últimos vinte anos. Ela inclui tudo que é necessário para entender a tecnologia, seu conceito, onde ela pode ser aplicada e como projetar pavimentos que incorporam materiais reciclados a frio. Ela será particularmente útil a quem tem pouca experiência em reciclagem e deseja aprender sobre a tecnologia. Entretanto, ela também será útil aos profissionais mais experientes já que inclui avanços alcançados com esforços de pesquisas recentes, principalmente no campo emocionante de estabilização betuminosa.
Em relação a esse ponto, a tecnologia evoluiu da reciclagem de materiais que incluíam misturas de materiais granulares, cimentados e asfálticos até a reciclagem de materiais compostos totalmente por pavimento asfáltico reciclado (RAP).

Com a publicação deste manual, a Wirtgen GmbH deseja partilhar seu conhecimento e entendimento da reciclagem a frio, não só com seus clientes que forneceram muitas das experiências, mas também com a comunidade global de construção de estradas, na crença de que o compartilhamento é o caminho para um avanço e um futuro mais brilhante para todos nós.

Glossário de abreviaturas

AADT	Média anual de trânsito diário (Apêndice 2)
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ADE	Média diária de trânsito equivalente (Apêndice 2)
BSM	Material estabilizado com betume (Capítulo 4)
BSM-emulsão	BSM feito com emulsão betuminosa (Seção 4.1.4)
BSM-espuma	BSM feito com espuma de asfalto (Seção 4.1.4)
CIR	Reciclagem a frio no local (Capítulo 6)
CBR	Índice de suporte Califórnia
CTB	Base tratada com cimento
DCP	Penetrômetro de cone dinâmico (Seção 2.5.4)
ELTS	Dureza eficaz de longo prazo (Seção 2.6.4)
EMC	Teor de umidade de equilíbrio
ESAL	Carga equivalente do eixo-padrão (80 kN) (Apêndice 2)
FWD	Deflectômetro de impacto (Seção 2.4.1)
GCS	Britas graduadas
HMA	Mistura asfáltica a quente
HVS	Simulador de veículo pesado
ITS	Força de tração indireta (Apêndice 1)
LTPP	Desempenho de pavimento de longo prazo
MDD	Densidade seca máxima
OMC	Teor de umidade ótima
Pen	Classificação de penetração (teste-padrão de betume)
PMS	Sistema de gerenciamento de pavimento
PI	Índice de plasticidade
PN	Número do pavimento (Seção 2.6.4)
PWoC	Valor presente do custo (Apêndice 4)
RAP	Pavimento de asfalto reciclado (asfalto fresado)
SN	Número estrutural (Seção 2.6.3)
TSR	Força de tração retida (Seção 4.3.11)
UCS	Resistência à compressão não confinada (Apêndice 1)
UTFC	Camada de atrito ultrafina (capa asfáltica)
WMA	Mistura asfáltica morna

Índice

1	Introdução	10
1	Pavimentos Rodoviários	15
1.1	Estruturas do pavimento	16
1.2	Componentes do pavimento	18
1.2.1	Camada de rolamento	18
1.2.2	Camadas estruturais	19
1.2.3	Subleito	21
1.3	Considerações primárias sobre a estrutura do pavimento	22
1.3.1	Condições ambientais	23
1.3.2	Carga de tráfego	25
1.4	Mecanismos de deterioração do pavimento	26
1.4.1	Deterioração avançada do pavimento	26
1.5	Manutenção e recuperação estrutural do pavimento	28
1.6	Opções de recuperação	30
1.6.1	Recuperação superficial	31
1.6.2	Recuperação estrutural	34
2	Recuperação do pavimento	38
2.1	Geral	41
2.2	Recuperação do pavimento: procedimento de investigação e projeto	42
2.3	PASSO 1: Coleta de dados/informações disponíveis ao processo	44
2.3.1	Informações sobre o pavimento existente (histórico)	45
2.3.2	Tráfego do projeto	46
2.4	PASSO 2: Investigações preliminares	48
2.4.1	Definição de trechos uniformes	49
2.4.2	Inspeção visual	52
2.4.3	Reavaliação de trechos uniformes	54
2.5	PASSO 3: Investigações detalhadas	55
2.5.1	Escavação de poços de ensaio	55
2.5.2	Testes de laboratório	56
2.5.3	Extração de corpos de prova	57

2.5.4	Sondas de penetrômetro dinâmico de cone (DCP)	58
2.5.5	Análise de medições de deflexão	60
2.5.6	Medições da profundidade de trilhas de roda	60
2.5.7	Síntese de todos os dados disponíveis	61
2.6	**PASSO 4: Opções preliminares do projeto de recuperação do pavimento**	**62**
2.6.1	Abordagem do projeto do pavimento	62
2.6.2	Métodos de projetos de catálogos	63
2.6.3	Método de número estrutural	63
2.6.4	Método do número do pavimento	64
2.6.5	Métodos de projeto mecanicista	66
2.6.6	Métodos com base em deflexão	67
2.6.7	Resumo de abordagens do projeto do pavimento	67
2.7	**PASSO 5: Projeto de mistura de laboratório**	**68**
2.8	**PASSO 6: Finalização das opções do projeto do pavimento**	**70**
2.9	**PASSO 7: Análises econômicas**	**71**
3	**Reciclagem a frio**	**73**
3.1	**Geral**	**75**
3.2	**O processo de reciclagem a frio**	**77**
3.2.1	Reciclagem em usina	78
3.2.2	Reciclagem in situ	79
3.3	**Máquinas para reciclagem in situ**	**84**
3.4	**Aplicações de reciclagem a frio**	**90**
3.4.1	Reciclagem 100% RAP	93
3.4.2	Combinação de material RAP/granular	94
3.5	**Vantagens da reciclagem a frio**	**97**
3.6	**Aplicabilidade do processo de reciclagem a frio**	**98**
4	**Agentes estabilizadores**	**100**
4.1	**Tipos de agentes de estabilização**	**103**
4.1.1	Geral	103
4.1.2	Comportamento do material	104

Índice

4.1.3	Agentes estabilizadores de cimento	105
4.1.4	Agentes estabilizadores de betume	106
4.1.5	Resumo dos diferentes agentes estabilizadores	109
4.2	**Estabilização com cimento**	**110**
4.2.1	Geral	110
4.2.2	Fatores que afetam a resistência	110
4.2.3	Rachaduras das camadas estabilizadas com cimento	111
4.2.4	Fragmentação superficial	114
4.2.5	Questões de durabilidade	115
4.2.6	Trabalhando com cimento	116
4.2.7	Tráfego precoce	120
4.2.8	Principais características dos materiais estabilizados com cimento	121
4.3	**Estabilização com betume**	**123**
4.3.1	Visão geral	123
4.3.2	Mecanismos de deterioração de materiais estabilizados com betume	126
4.3.3	Principais determinantes do desempenho de materiais estabilizados com betume	127
4.3.4	Material a ser estabilizado com betume	128
4.3.5	Agentes estabilizadores de betume	136
4.3.6	Filler ativo	140
4.3.7	Qualidade da água	141
4.3.8	Procedimento do projeto de mistura	142
4.3.9	Classificação dos materiais estabilizados com betume	144
4.3.10	Trabalhando com materiais estabilizados com betume	146
4.3.11	Ensaios mecânicos	152
4.3.12	Abordagens do projeto do pavimento para materiais estabilizados com betume	154
4.4	**Resumo: Vantagens e desvantagens dos agentes estabilizadores de cimento e betume**	**160**
5	**Soluções em reciclagem**	**163**
5.1	**Diretrizes para a reciclagem de diferentes pavimentos**	**165**
5.1.1	Estradas com trânsito leve (capacidade estrutural: 0,3 milhão de ESALs)	166
5.1.2	Estradas com baixo volume (capacidade estrutural: 1 milhão de ESALs)	168
5.1.3	Vias rurais secundárias (capacidade estrutural: 3 milhões de ESALs)	170

5.1.4	Vias rurais principais (capacidade estrutural: 10 milhões de ESALs)	172
5.1.5	Rodovias interurbanas (capacidade estrutural: 30 milhões de ESALs)	174
5.1.6	Rodovias principais com várias pistas (capacidade estrutural: 100 milhões de ESALs)	176
5.2	**Alternativas para a recuperação de pavimentos**	**178**
5.2.1	Pavimento existente	180
5.2.2	Requisitos de recuperação	181
5.2.3	Opções de recuperação	182
5.2.4	Requisitos de manutenção	190
5.2.5	Custos de construção e manutenção	192
5.2.6	Consumo de energia	195
5.2.7	Observações pertinentes	199
6	Reciclagem de material 100% pavimento de asfalto reciclado (RAP)	201
6.1	**Material RAP**	**203**
6.1.1	Ligante betuminoso	203
6.1.2	Classificação do material RAP	205
6.2	**Usos para o material RAP reciclado a frio**	**206**
6.2.1	Material RAP não tratado	206
6.2.2	Material RAP tratado com cimento	207
6.2.3	Material RAP tratado com emulsão betuminosa	207
6.2.4	Material RAP tratado com espuma de asfalto	211
Bibliografia		214
Apêndice 1 – Procedimentos de laboratório para materiais estabilizados (projetos de mistura)		218
Apêndice 2 – Definição da capacidade estrutural com base nas informações de trânsito		307
Apêndice 3 – Diretrizes para compilar especificações para obras de reciclagem		320
Apêndice 4 – Princípios de análise econômica		355

Introdução

O Manual de reciclagem a frio da Wirtgen foi publicado pela primeira vez em 1998 em língua inglesa. Devido aos avanços na tecnologia de reciclagem, sua revisão foi necessária depois de seis anos, por isso a Segunda Edição foi publicada em 2004. A Segunda Edição foi bem recebida e em poucos anos ela foi traduzida em vários idiomas. Ao final de 2009, mais de 50 mil exemplares haviam sido distribuídos no mundo todo, com no mínimo o mesmo número de exemplares baixados a partir da página de Internet www.wirtgen.de.

Assim como na Primeira Edição, a Segunda Edição atraiu bastante atenção, com um número crescente de trabalhos, artigos acadêmicos e outras publicações técnicas que citavam o manual. Parecia que a Segunda Edição do Manual de reciclagem a frio da Wirtgen havia dado continuidade à historia de sucesso estabelecida pela reputação de seu antecessor como o principal material de referência a respeito da tecnologia de reciclagem a frio.

Faz quase uma década que a Segunda Edição foi publicada. Durante esse tempo, o interesse na reciclagem se intensificou, o que se reflete no número crescente de recicladoras comercializadas no mundo todo a cada ano. Isso incentivou a equipe de pesquisa e desenvolvimento da sede da Wirtgen a dar continuidade às melhorias das máquinas que a empresa fabrica, com base nas opiniões recebidas de sua rede mundial de engenheiros de assistência técnica e clientes. Tal aumento na atividade em campo atraiu o interesse da comunidade acadêmica, o que levou a tecnologia de reciclagem a frio a dar um passo enorme graças ao desenvolvimento dessas pesquisas. Desde 2004, muitas pesquisas inovadoras têm sido desenvolvidas, principalmente em relação à estabilização com betume, uma tecnologia que é ideal para a reciclagem a frio.

Esses desenvolvimentos e melhorias de fato ultrapassaram alguns trechos da Segunda Edição. Isso, combinado com o status de “documento de referência” adquirido pelo Manual, exigiu uma revisão e uma atualização rigorosas dos conteúdos, um processo que destacou a necessidade de uma edição totalmente revisada. Além disso, as informações que precisam constar no Manual aumentaram exponencialmente e são muito volumosas para uma única publicação. Assim, a decisão foi no sentido de substituir o manual por duas publicações:

- A publicação Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen se concentra nos aspectos teóricos dos pavimentos e dos projetos pertinentes à reciclagem a frio. Ela contém uma explicação detalhada da reciclagem a frio e é particularmente útil aos engenheiros envolvidos na utilização de materiais e no projeto de pavimentos.

- A publicação Aplicação da reciclagem a frio Wirtgen abrange os aspectos práticos da aplicação dessa tecnologia. Essa publicação separada descreve os vários processos de construção, sendo muito útil a diversos profissionais envolvidos e engenheiros de campo em relação à reciclagem a frio.

Assim como nos Manuais de reciclagem a frio anteriores, essas novas publicações se concentram na reciclagem de materiais “a frio” para o uso em pavimentos flexíveis. Elas não abrangem a reciclagem de materiais “a quente” nem incluem em seu escopo pavimentos rígidos (concreto), sendo que esses tópicos constituem especialidades distintas. Além disso, elas não tratam de asfalto morno ou semimorno. A tecnologia de espuma de asfalto é uma combinação ideal com tais misturas, porém são necessários ajustes às

avaliações das misturas e ao projeto do pavimento, assunto que não é tratado neste manual.

Esta 1ª Edição da Tecnologia de reciclagem a frio da Wirtgen inclui o seguinte:

O Capítulo 1 apresenta uma visão geral sobre os pavimentos. Ele contém uma explicação da composição das estruturas do pavimento e uma breve descrição dos principais fatores que influenciam a seleção dos vários materiais usados na construção das diferentes camadas e como eles se comportam (e se deterioram) quando sujeitos a cargas dinâmicas. Isso nos leva ao assunto da recuperação de pavimentos e introduz o conceito de reciclagem a frio, tanto in situ como na usina.

O Capítulo 2 se concentra na recuperação de pavimentos e descreve o trabalho de engenharia necessário para a formulação de um projeto adequado, principalmente os aspectos pertinentes à reciclagem a frio. Investigações de pavimento, análises de material e projetos de pavimento são assuntos tratados em detalhes em um procedimento de sete passos que culmina em uma seção sobre análises econômicas para ajudar na avaliação dos méritos financeiros das diferentes opções de recuperação.

O Capítulo 3 explica a reciclagem a frio e as várias aplicações que podem ser consideradas, tanto in situ como na usina. A linha de recicladoras da Wirtgen é apresentada juntamente com uma explicação sobre o tipo de reciclagem mais adequado para cada máquina. Esse capítulo também apresenta um resumo dos benefícios obtidos com a adoção de uma abordagem de reciclagem a frio e da adequação do processo para a construção de camadas de pavimento, tanto para estradas novas como para a recuperação de pavimentos deteriorados.

O Capítulo 4 se concentra nos agentes estabilizadores que são normalmente aplicados no processo de reciclagem a frio. São explicados em detalhes os procedimentos de projetos de misturas e de pavimentos tanto em relação a agentes estabilizadores de cimento como de betume. Foram incluídos os desenvolvimentos recentes no campo de materiais estabilizados com betume. Esses desenvolvimentos foram responsáveis pelo avanço da tecnologia tratada na Segunda Edição do Manual de reciclagem a frio da Wirtgen, despertando a necessidade de uma revisão.

O Capítulo 5, intitulado “Soluções em reciclagem”, utiliza um formato de “projeto de catálogo” para mostrar uma série de estruturas de pavimentos típicos para a recuperação por reciclagem, incluindo tanto as opções de estabilização com cimento como com betume. Seis classes de tráfego entre 300.000 e 100 milhões de cargas de eixo-padrão (ESALs) são apresentadas, cada qual com diferentes condições de capacidade do subleito que são normalmente encontradas em cada classe. Depois, segue um exemplo de diferentes opções que podem ser usadas para a recuperação de um pavimento específico com requisito de uma capacidade estrutural de 20 milhões de ESALs. Uma estrutura existente (deteriorada) de pavimento é usada para a seleção de quatro soluções de recuperação assim como os requisitos de manutenção para cada uma para uma vida útil de 20 anos, juntamente com o requisito de recuperação correspondente depois de 20 anos. O custo integral de cada opção é então avaliado com o uso de diferentes taxas de desconto. Além disso, a energia consumida por todas as atividades de construção durante a vida útil de cada opção de recuperação é avaliada.

O Capítulo 6 se concentra na reutilização de material 100% de pavimento de asfalto reciclado

(RAP) em um processo de reciclagem a frio. Esse assunto não era tratado de forma detalhada nos manuais anteriores e foi incluído para atender ao interesse crescente demonstrado no mundo todo pela reciclagem com esse tipo específico de material usando-se um “processo a frio”. (O processo de reciclagem in situ também é conhecido em alguns países como “reciclagem a frio no local” e “reciclagem de profundidade parcial”).

Uma lista das referências bibliográficas pertinentes é apresentada imediatamente após o Capítulo 6.

Os quatro apêndices contêm uma série de informações adicionais, todas relevantes à reciclagem a frio, mas sua inclusão nos capítulos tornaria o manual muito denso.

O Apêndice 1 descreve os procedimentos de laboratório para materiais estabilizados (projetos de mistura). Depois disso, apresenta-se um cronograma de equipamentos necessários para a realização do trabalho laboratorial.

O Apêndice 2 descreve a metodologia usada para a definição dos critérios corretos para o projeto do pavimento (requisito de capacidade estrutural) a partir dos dados de tráfego.

O Apêndice 3 inclui diretrizes para compilar especificações de construção adequadas para obras de reciclagem a frio.

O Apêndice 4 fornece informações preliminares úteis para análises econômicas.

A recuperação de pavimentos está se tornando cada vez mais importante à medida que a condição geral da infraestrutura viária mundial continua a se deteriorar e muitos países estão enfrentando um declínio contínuo no padrão de suas redes viárias com o passar do tempo.

Os serviços de manutenção e recuperação crescentes exigidos para alcançar níveis aceitáveis de uso colocam uma grande pressão nos orçamentos nacionais. Essa situação é exacerbada pela tendência global de volumes crescentes de trânsito compostos por cargas por eixo-padrão e pressão de pneus cada vez maiores, sendo que tais fatores contribuem para a deterioração dos pavimentos.

Esse espiral negativo só pode ser tratado por um aumento maciço nos orçamentos rodoviários ligados à inovação no campo da engenharia de pavimentos.
Uma vez que os orçamentos rodoviários que estão aumentando são poucos, o foco está sendo colocado na inovação para alcançarmos mais com relativamente menos gastos.A reciclagem claramente recai nesta última categoria e os registros mostram que o número de quilômetros/pista de pavimentos deteriorados que estão sendo recuperados usando o processo de reciclagem a frio está aumentando a cada ano. A economia é o principal motivo que explica esse fenômeno já que ele reflete a eficácia de custos do processo.

1 Pavimentos Rodoviários

1.1	Estruturas do pavimento	16
1.2	Componentes do pavimento	18
1.2.1	Camada de rolamento	18
1.2.2	Camadas estruturais	19
1.2.3	Subleito	21
1.3	Considerações primárias sobre a estrutura do pavimento	22
1.3.1	Condições ambientais	23
1.3.2	Carga de tráfego	25
1.4	Mecanismos de deterioração do pavimento	26
1.4.1	Deterioração avançada do pavimento	26
1.5	Manutenção e recuperação estrutural do pavimento	28
1.6	Opções de recuperação	30
1.6.1	Recuperação superficial	31
1.6.2	Recuperação estrutural	34

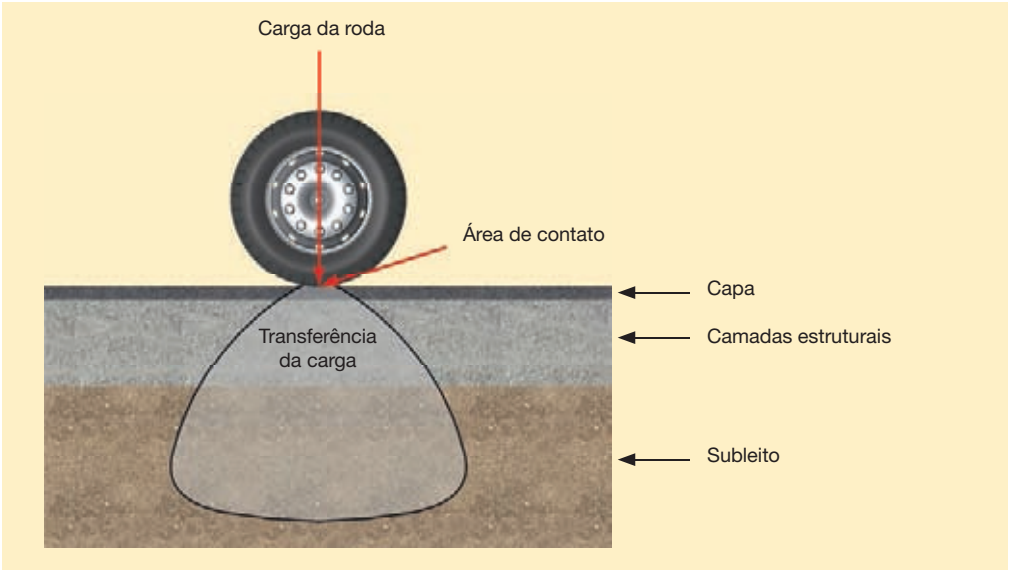
1.1 Estruturas do pavimento

Os pavimentos rodoviários são compostos por três componentes básicos:

- Capa: A superfície de rolamento que é normalmente a única parte visível da estrada.
- Camadas estruturais: As camadas que distribuem a carga, compostas por diferentes materiais, geralmente ultrapassando a profundidade de um metro.
- Subleito: A "terra" existente sobre a qual a estrada é construída.

Os subleitos normalmente têm uma baixa capacidade de carga e não podem suportar cargas de trânsito diretamente, então camadas protetoras são necessárias. O objetivo da camada de rolamento é predominantemente funcional, fornecendo a toda a camada de rolamento propriedades de conforto, segurança e consideração ambiental (ex.: baixo nível de ruído). As camadas estruturais distribuem as cargas de alta intensidade geradas pelo trânsito sobre uma área mais ampla do subleito, conforme ilustrado na figura abaixo.

As camadas da estrutura do pavimento podem variar em sua composição (tipo de material) e espessura. As camadas mais próximas da superfície são construídas com o uso de materiais de alta resistência (ex.: asfalto quente) para acomodar as altas tensões. As camadas de asfalto individuais raramente ultrapassam a espessura de 100 mm. À medida que a carga é distribuída sobre uma área mais ampla nas camadas inferiores, o nível de tensão é reduzido e pode ser transferido por mate-



Transferência da carga pela estrutura do pavimento

riais de qualidade inferior (ex.: cascalho natural ou materiais levemente cimentados). Em decorrência disso, os materiais nas camadas inferiores são geralmente baratos em relação aos materiais das camadas superiores. A espessura dessas camadas estruturais individuais varia de 125 a 250 mm. A Seção 1.2 abaixo discute os vários componentes do pavimento.

Basicamente, existem dois tipos de pavimento:

- Os pavimentos rígidos com uma camada espessa de concreto de alta resistência sobre uma camada ligada; e
- Os pavimentos flexíveis construídos a partir de materiais naturais, com as camadas superiores às vezes sendo ligadas (normalmente por betume e/ou levemente cimentadas) para alcançar requisitos de resistência mais altos.

Geralmente, apenas os pavimentos flexíveis podem ser reciclados in situ economicamente.

Os pavimentos rígidos construídos a partir de concreto de alta resistência são normalmente demolidos ao final de sua vida útil. Embora este manual trate somente de pavimentos flexíveis caracterizados por superfícies betuminosas, pavimentos de concreto não armado têm sido reciclados in situ com sucesso. (Mais informações sobre essa aplicação especializada podem ser obtidas junto à Wirtgen).

Depois da construção, a estrada está sujeita a forças decorrentes de duas fontes primárias, o meio ambiente e o trânsito. Ambas atuam continuamente, reduzindo a qualidade de rodagem e a integridade estrutural. Essas forças destrutivas são discutidas na Seção 1.3. As seções seguintes descrevem os mecanismos de deterioração dos pavimentos e o que pode e deve ser feito para retardar esse processo (manutenção), além das medidas para recuperar o seu nível de uso depois que a deterioração alcançar um nível inaceitável (recuperação estrutural).

Candidato ideal para a reciclagem in situ

1.2 Componentes do pavimento

Cada um dos três componentes básicos descritos acima serve a um propósito específico e único, conforme a explicação seguinte.

1.2.1 Camada de rolamento

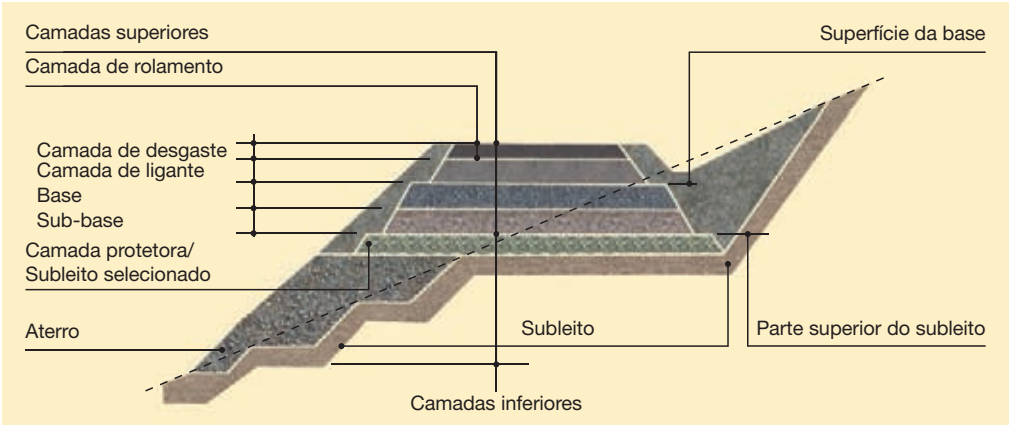
A camada de rolamento é a interface do pavimento com o tráfego e o meio ambiente. Sua função é proteger a estrutura do pavimento de ambos, proporcionando durabilidade e impermeabilidade.

Proteção contra os efeitos do tráfego. O tráfego afeta a camada de rolamento de duas maneiras:

- As tensões decorrentes das cargas de rodas na superfície são predominantemente aplicadas no plano vertical, mas tensões horizontais podem se tornar significativas, principalmente com ações de giro e frenagem do trânsito e sobre inclinações acentuadas. As características de resistência e rigidez do material usado na camada de rolamento devem ser capazes de resistir a todas essas tensões sem causar rachaduras nem deformações; e
- a abrasão dos pneus em contato com a pista, principalmente durante manobras, tende a polir a superfície. Com o tempo esse efeito de polimento reduz as propriedades de atrito (aderência) e a profundidade da texturização da camada de rolamento. Essas pistas se tornam pouco aderentes, principalmente quando molhadas, e podem ser perigosas.

Proteção contra efeitos ambientais. A camada de rolamento está continuamente sujeita a várias formas de ataque de fatores ambientais.

Os efeitos térmicos, a oxidação e a radiação ultravioleta são os mais agressivos. Por isso, a camada de rolamento precisa apresentar as seguintes propriedades:



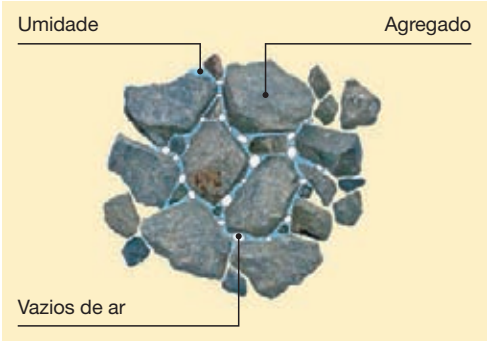
Projeto de estrada em aterro e corte

- elasticidade para permitir o movimento contínuo de expansão e contração à medida que a temperatura mudar; e
- durabilidade para absorver o bombardeio diário de radiação ultravioleta e lidar com a exposição esporádica à água e aos efeitos químicos, com a manutenção de um desempenho aceitável.

Além da aderência, a camada de rolamento proporciona flexibilidade, durabilidade e impermeabilidade superior. O asfalto quente (com teor de betume de aproximadamente 5% por massa) é geralmente usado como uma capa asfáltica de alta qualidade para estradas com trânsito pesado, enquanto os tratamentos superficiais com pedriscos são aplicados no caso de volumes de trânsito menores.

1.2.2 Camadas estruturais

A estrutura do pavimento transfere a carga da superfície ao subleito. Conforme descrito acima, as tensões aplicadas por uma roda na superfície são efetivamente reduzidas na estrutura do pavimento com a sua distribuição por uma área mais ampla do subleito.
A estrutura do pavimento geralmente consiste em várias camadas de material com diferentes características de resistência e rigidez, sendo que cada camada atende ao objetivo de distribuir a carga que recebe na parte superior por uma área mais ampla na parte inferior.
As camadas na parte superior da estrutura estão sujeitas a níveis mais altos de tensão que aquelas na parte inferior e, assim, precisam ser construídas a partir de materiais mais fortes e rígidos.
A figura na página anterior mostra as diferentes camadas que são tipicamente usadas na construção de pavimentos flexíveis.



Material não ligado ou granular

A reação de uma camada a uma carga imposta depende muito das propriedades do material (elasticidade, plasticidade e viscosidade) e das características da carga (magnitude, taxa de carga, etc.).

Pavimentos flexíveis são construídos a partir de três tipos de material:

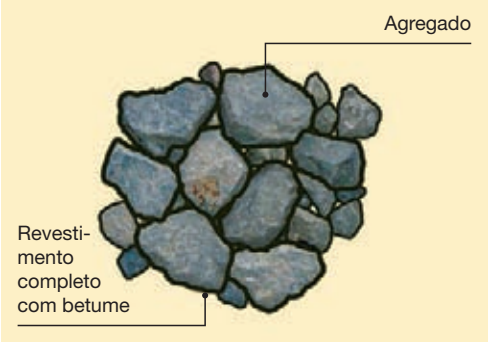
- Os materiais não ligados (granulares), que incluem britas e cascalhos, transferem as cargas aplicadas através das partículas individuais, ou esqueleto, de sua matriz. O atrito entre partículas mantém a integridade estrutural, mas mediante uma carga repetida (geralmente associada ao aumento do teor de umidade), um processo gradativo de adensamento ocorre à medida que as partículas se reorientam e se deslocam mais próximas umas das outras. Isso pode ocorrer em qualquer nível da estrutura do pavimento e, em última análise, resulta na deformação da capa. Essa deformação normalmente se manifesta na forma de sulcos com raios amplos nas trilhas de rodas.

- Os materiais ligados, que incluem materiais estabilizados com cimento e asfalto, atuam mais como uma viga larga. A aplicação de uma carga vertical na superfície de uma viga gera uma tensão compressiva horizontal na metade superior da viga e tração horizontal na metade inferior, com as tensões horizontais máximas no topo e no fundo. A deformação resultante dessas tensões, principalmente a deformação por tração na parte inferior, em última análise leva ao tipo de falha por fadiga depois de muitas repetições de carga. As rachaduras se desenvolvem na parte inferior da camada e se propagam verticalmente à medida que as repetições de carga continuam.
- Materiais ligados não continuamente, que compreendem os materiais estabilizados com betume, com espuma de asfalto ou emulsão de betume como ligantes, comportam-se como materiais granulares com atrito particular retido mas com o aumento de coesão e rigidez. A deformação permanente é o principal modo de deterioração dos materiais estabilizados com betume. O betume não é continuamente disperso nesses materiais e a fadiga não é considerada no projeto.

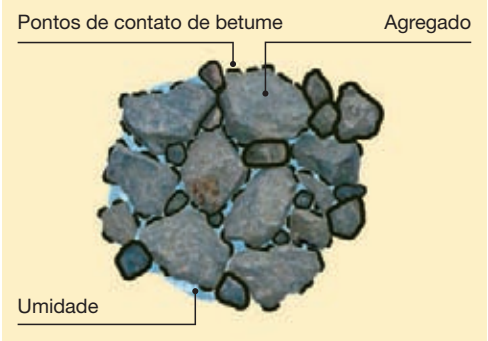
A deformação que ocorre em materiais não ligados ou não continuamente ligados e a rachadura por fadiga dos materiais ligados estão relacionadas ao número das repetições de carga.

Observação:

- Materiais estabilizados com betume são ligados não continuamente



Ligado – mistura de asfalto a quente



Não ligado continuamente – Betume estabilizado

Isso permite que a vida funcional do pavimento seja definida em termos do número de vezes que ele pode suportar uma carga antes de “falhar”, o que chamamos de “capacidade estrutural” do pavimento.

1.2.3 Subleito

O material natural que fornece o suporte à estrutura do pavimento pode ser material in situ (condição de corte) ou importado (condição de aterro). As características de resistência desse material ditam o tipo de estrutura de pavimento necessária para distribuir a carga aplicada na superfície em relação a uma magnitude que possa ser suportada sem que o subleito se degrade devido à deformação permanente.

Os métodos de projeto de pavimentos normalmente utilizam a resistência e a rigidez do subleito como parâmetros de análise e buscam construir uma estrutura com a espessura suficiente e a resistência necessária para proteger o subleito.

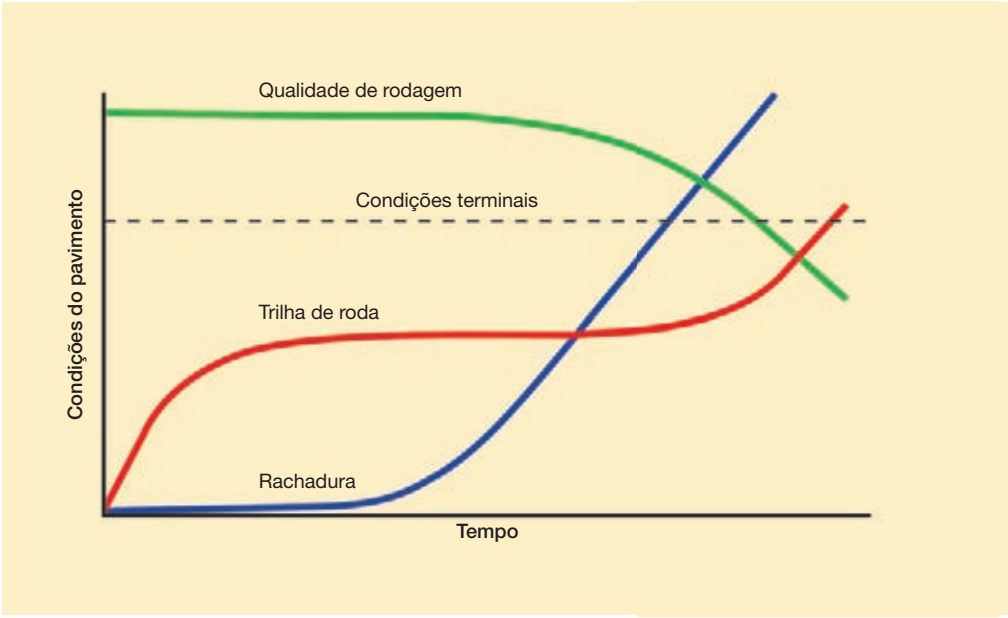
Essa abordagem foi adotada na década de 1950, com o método de "projeto de capa" chamado Índice de suporte Califórnia (CBR), e continua sendo usada no século XXI. Em geral, as estruturas espessas de pavimentos devem proteger subleitos ruins, sendo que essa espessura é normalmente alcançada com o acréscimo de um "subleito selecionado" ou camada protetora.

Em alguns casos, os subleitos podem compreender solos sujeitos a colapsos, solos argilosos, moles ou em consolidação e dispersivos ou erosivos. Em tais condições, investigações geotécnicas, ensaios e projetos especializados são necessários.

1.3 Considerações primárias sobre a estrutura do pavimento

Estradas são construídas no mundo todo, em todos os tipos de clima, desde os desertos quentes e secos até regiões com altos níveis de precipitação e condições congeladas da tundra. Ainda assim, independentemente das condições climáticas, cada estrada é projetada para resistir à carga do trânsito com o mesmo mecanismo fundamental de transferência das forças de alta intensidade aplicadas na superfície pelas cargas das rodas para os níveis inferiores que o subleito consegue acomodar sem deformação.

As condições ambientais específicas e a carga de trânsito prevista são as duas principais considerações de projeto para qualquer pavimento, sendo tratadas separadamente abaixo. Esses fatores definem as condições do pavimento e a taxa de deterioração. Em geral, a deterioração do pavimento é medida indiretamente pela avaliação da qualidade de rodagem, mas as características visíveis mais óbvias tais como profundidade de trilha de roda e rachaduras da capa também são pertinentes. Cada mecanismo de deterioração tem a sua própria função de desempenho no tempo, conforme podemos ver na figura abaixo.



Evolução da deterioração do pavimento

1.3.1 Condições ambientais

As condições ambientais são consideradas separadamente em relação à camada de rolamento e às camadas estruturais.

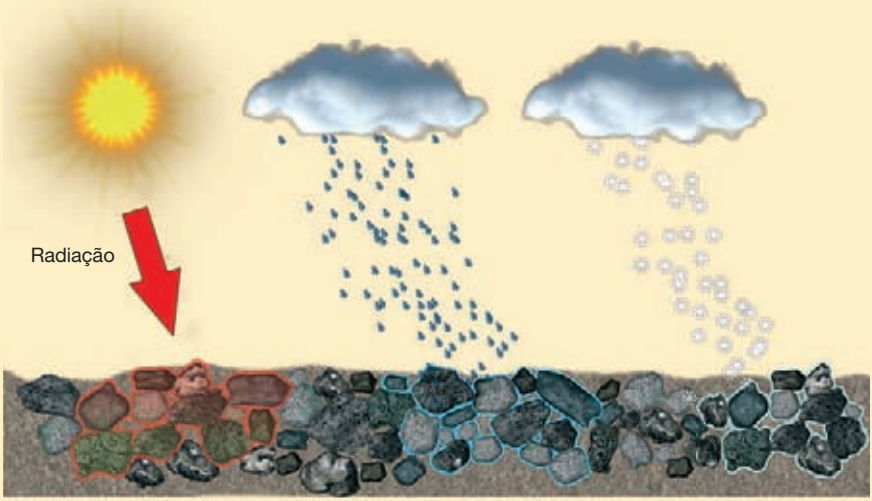
A camada de rolamento. Além do trânsito, as camadas de rolamento são expostas à luz solar, ao vento, à chuva e à neve, dentre outros fatores naturais. São importantes as consequências desses fatores em relação às propriedades de engenharia da camada de rolamento, o que se manifesta em:

- efeitos térmicos que causam mudanças no volume à medida que os materiais se expandem e se contraem em reação às mudanças de temperatura. A faixa de temperatura diária da camada de rolamento é importante. Em áreas desérticas, a camada de rolamento de uma estrada pode sofrer uma alteração de temperatura acima de 70 ºC entre o amanhecer até o meio-dia, enquanto camadas de rolamento no Círculo Polar Ártico durante o inverno podem ficar cobertas em neve e gelo e, assim, permanecer a uma temperatura relativamente constante;
- efeitos de congelamento que criam um fenômeno conhecido como geada; O congelamento e degelo de forma repetida podem causar grandes prejuízos nas camadas de rolamento;
- os efeitos da radiação que fazem com que as camadas de rolamento sofram um tipo de "queimadura solar". A radiação ultravioleta que atinge a camada de rolamento faz com que o betume se oxide e que ele se torne quebradiço. Esse processo é conhecido como envelhecimento; e
- os efeitos da umidade em que a água da chuva penetra nos vazios da camada de rolamento e acumula pressões nos poros sob a carga de rodas, quebrando a ligação entre o betume e o agregado, causando a rachadura e a quebra do asfalto.

A estrutura do pavimento. A água é o pior inimigo das estruturas rodoviárias. A saturação de água faz com que os materiais amoleçam e se deteriorem, além de fornecer a lubrificação entre as partículas com a aplicação da carga. A capacidade de carga de um material em um estado seco é significativamente maior que em estado úmido, e quanto mais coesivo o material (ou argiloso), mais suscetível à umidade ele será. Além disso, a água presente quando o gelo entra em uma estrutura de pavimento se expandirá e causará danos com o seu degelo. Por isso é tão importante evitar a entrada de água na estrutura do pavimento, principalmente nos materiais de qualidade inferior encontrados nas camadas inferiores.

Os fatores ambientais são responsáveis pela maior parte das rachaduras iniciadas na capa. A maior contribuição para esse fenômeno é a radiação ultravioleta da luz solar que causa um endurecimento lento e contínuo do betume. Com o endurecimento ocorre uma redução na elasticidade, o que resulta na rachadura à medida que a camada de rolamento se contrai quando resfria ou se flexiona mediante cargas de rodas.

Uma vez que a integridade da superfície se perde devido à rachadura, o pavimento tende a se deteriorar a uma taxa acelerada devido à entrada da água. Os principais fatores ambientais que afetam os pavimentos estão descritos na figura abaixo.



Efeitos ambientais

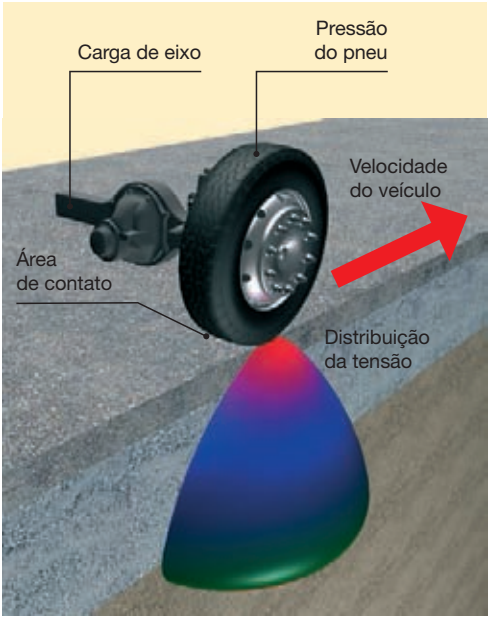
1.3.2 Carga de tráfego

As estradas são construídas para suportar o tráfego. O volume e o tipo de tráfego que uma estrada deve suportar ditarão as suas exigências geométricas e estruturais. Engenheiros de transporte trabalham com base em estatísticas de tráfego (em termos de números de veículos, composição e tamanhos) para definir os requisitos da capacidade geométrica (alinhamento, número de pistas, etc.). Os engenheiros de pavimento precisam de acesso antecipado às estatísticas de tráfego (em termos de números de veículos, configuração e massa de eixos) para definir os requisitos estruturais. Previsões precisas de volume e tipo de tráfego são, portanto, de suma importância.

As características importantes do tráfego do ponto de vista do projeto de pavimentos são aquelas que possibilitam a definição da magnitude e frequência das cargas aplicadas à capa que a estrada pode esperar durante a vida útil projetada do pavimento. A carga aplicada sobre a camada de rolamento pelos pneus é definida por três fatores:

- força (em kN) de fato aplicada pelo pneu, juntamente com
- a pressão interna (em kPa) que define a "pegada" do pneu na estrada. Essa pegada define a área na superfície que está sujeita à carga, e
- a velocidade de deslocamento que define a taxa com que o pavimento é carregado ou descarregado.

Os carros de passeio tipicamente têm pressões de pneu na faixa de 180 a 250 kPA e suportam menos que 350 kg por pneu ou 7 kN em um eixo. Essa carga é estruturalmente insignificante quando comparada àquela aplicada por um caminhão de grande porte usado no transporte de cargas pesadas, que utiliza uma faixa de 80 a 130 kN por eixo (dependendo dos limites legais e do controle de massa) com pressões que variam de 500 a 1.300 kPa. Claramente, a carga desses veículos pesados terá a maior influência nos requisitos de resistência de um pavimento e, por isso, será tratada no Capítulo 2, Recuperação de pavimentos, e tratada em detalhes no Apêndice 2, Definição da capacidade estrutural com base nas informações do trânsito.



Carga de tráfego

1.4 Mecanismos de deterioração do pavimento

A carga do tráfego é responsável pelo desenvolvimento de trilhas de roda e rachaduras que iniciam nas camadas ligadas. Cada veículo que utiliza a estrada causa uma pequena medida de deformação na estrutura do pavimento. A deformação causada por veículos leves é tão pequena que se torna insignificante, enquanto veículos com carga pesada causam deformações relativamente maiores. A passagem de muitos veículos desenvolve um efeito cumulativo que gradativamente leva à permanente deformação e/ou rachadura por fadiga. Eixos sobrecarregados causam uma quantidade desproporcional de prejuízos à estrutura do pavimento, acelerando a referida deterioração. Essa deterioração é causada por dois diferentes mecanismos:

- a deformação permanente causada pelo adensamento, em que as tensões de cargas repetidas fazem com que as partículas individuais na camada do pavimento se aproximem, o que resulta na perda de vazios ou no cisalhamento de partículas ao passarem umas pelas outras (defeito localizado devido ao cisalhamento). Em materiais granulares e ligados não continuamente, essa perda de vazios leva a um aumento da resistência (materiais mais densos são mais fortes). O oposto se aplica ao asfalto. Deve-se considerar, entretanto, que uma redução no teor de vazios no asfalto não só causa trilhas de roda, mas também possibilita que o betume comece a atuar como um fluido quando estiver morno, criando um meio para pressões hidráulicas geradas com base nas cargas de rodas impostas. Isso causa o deslocamento lateral ou deslocamento ao longo das bordas das trilhas de rodas; e
- rachadura por fadiga dos materiais ligados. Esse fenômeno começa na parte inferior da camada onde a tração causada pelas cargas de rodas atinge seu máximo.Essas rachaduras se propagam até a superfície. A rachadura de cima para baixo pode ocorrer em camadas de asfalto de maior espessura. A deformação permanente do material subjacente acentua as rachaduras efetivamente aumentando a tração imposta pelas cargas de rodas.

1.4.1 Deterioração avançada do pavimento

Depois que a rachadura penetrar a capa de proteção, a água poderá entrar na estrutura subjacente do pavimento. Conforme descrição anterior, o efeito de amolecimento causado pela água leva a uma redução da resistência, o que resulta em uma taxa maior de deterioração mediante a repetição de cargas de roda.

Além disso, a água em um material saturado se torna um meio destrutivo quando o pavimento sofre a aplicação de cargas. Semelhante a um fluido hidráulico, a água transmite predominantemente cargas de roda verticais em pressões que rapidamente erodem a estrutura do material granular e causam a remoção do betume do agregado no asfalto. Mediante essas condições, as frações de finos do material do pavimento são expulsas para cima através das rachaduras (algo conhecido como “bombeamento”), o que resulta no desenvolvimento de vazios no pavimento. O que segue é a formação rápida de buracos e a deterioração generalizada do pavimento.

Quando as temperaturas são inferiores a 4 ºC, qualquer água livre no pavimento se expande à medida que congela, criando pressões hidráulicas,

Deterioração típica de um pavimento por “bombeamento”

mesmo na ausência da aplicação de cargas de roda. O empolamento pela geada, causado pela repetição dos ciclos de congelamento e degelo, constitui o pior cenário para a rachadura de pavimento, levando a uma deterioração rápida.

Mediante condições secas e desérticas, as rachaduras na camada de rolamento geram um tipo de problema diferente. À noite, quando as temperaturas são relativamente baixas (frequentemente abaixo do ponto de congelamento) a capa se contrai, fazendo com que as rachaduras se alarguem e atuem como um refúgio para a areia soprada pelo vento. Quando as temperaturas sobem, durante o dia, a capa não consegue se expandir pela areia presa na rachadura, fazendo com que as forças horizontais causem a falha localizada (desagregação) na borda da rachadura.

Essas forças podem, em última análise, fazer com que a capa levante a estrutura do pavimento na proximidade das rachaduras, gerando uma qualidade de rodagem extremamente ruim.

Outra condição de falha vista com frequência em ambientes desérticos é a rachadura em blocos causada por um teor de umidade extremamente baixo em materiais densos. Esse fenômeno é conhecido como “pressão de sucção de fluido de poro”. Devido ao regime de umidade relativamente baixa, a água é perdida da estrutura do pavimento devido à evaporação, reduzindo o teor de umidade a níveis semelhantes àqueles alcançados quando o ar seca amostras no laboratório. Com tais teores de umidade, os meniscos das gotículas de água que permanecem nos pequenos vazios de um material compactado exercem forças de tração suficientes para causar a rachadura do material.

Essa condição tem maior probabilidade de manifestação quando os níveis de umidade relativa forem baixos e a estrada não for vedada, permitindo que a umidade na estrutura do pavimento evapore. Ela também já foi referida como a causa de rachaduras de cima para baixo em grande altitude (> 2.000 m). O único tratamento eficaz para essa condição é a vedação da estrada para que o teor de umidade equilibrado seja retido (ou seja, o efeito de hidrogenia). Se o material secar, rachaduras profundas e graves ocorrerão, mesmo em areia compactada. Se o material se tornar molhado, as forças capilares reduzirão e a “coesão aparente” se dissipará.

Outra causa de rachaduras superficiais, principalmente em capas asfálticas, resulta da falta de trânsito. A ação de contato do trânsito mantém a vida do betume. A oxidação e o endurecimento subsequente causam rachaduras térmicas na superfície do ligante betuminoso. Sujeitar o betume a repetições de tensão causa tensão suficiente para fechar as rachaduras à medida que se formam, assim evitando a sua propagação.

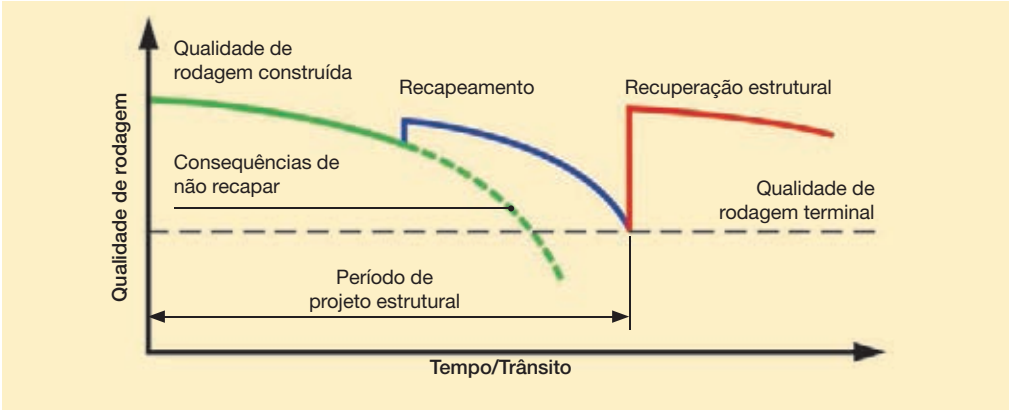
1.5 Manutenção do pavimento e recuperação estrutural

As atividades de manutenção do pavimento normalmente se concentram em manter a água fora e longe da estrutura do pavimento. Isso envolve a manutenção da camada de rolamento em um estado de impermeabilidade e garantir que medidas de escoamento sejam eficazes para que a água não se acumule nas pistas de rodagem ou ao longo da borda da via.

A água normalmente entra na estrutura superior do pavimento através de rachaduras na capa, o que é geralmente auxiliado pelo acúmulo de água sobre a superfície. As rachaduras devem ser vedadas à medida que surgem e as extremidades viárias devem ser aparadas para promover o escoamento. Se tratados de forma precoce, os efeitos do envelhecimento podem ser efetivamente tratados pela aplicação da pulverização de emulsão betuminosa diluída. Condições mais sérias exigem a aplicação de um tratamento superficial com pedriscos no caso de baixos volumes de trânsito ou uma camada convencional de asfalto quente.

Essas medidas, dirigidas à manutenção da flexibilidade e durabilidade da camada de rolamento, somente tratam da deterioração devido ao meio ambiente. A deformação e a rachadura por fadiga, causadas pela carga do tráfego, não podem ser tratadas com eficácia pelas atividades de manutenção superficial e exigem uma forma de recuperação estrutural.

A deterioração do pavimento começa a um ritmo relativamente lento. Os indicadores do pavimento podem ser usados para monitorar a taxa de deterioração. Os órgãos responsáveis pelas estradas de rodagem geralmente empregam um sistema de base de dados, conhecido como Sistema de Gerenciamento de Pavimento, para monitorar continuamente a qualidade de rodagem de todos os pavimentos de sua malha rodoviária, assim chamando a atenção aos que requerem maior cuidado. A figura abaixo apresenta uma representação típica de um Sistema de Gerenciamento de Pavimento que ilustra a eficácia de medidas de manutenção e recuperação em tempo hábil.



Gerenciamento da manutenção e recuperação do pavimento monitorando a qualidade de rodagem

A figura destaca a importância da tomada de ações ágeis para manter a mais alta qualidade de rodagem possível. A taxa de deterioração é indicada pela qualidade de rodagem. A piora da qualidade de rodagem incentiva taxas mais rápidas de deterioração através das cargas dinâmicas. À medida que a qualidade de rodagem diminui, a escala das medidas de remediação se torna maior, assim como o custo de tais medidas.

A decisão de quais medidas de remediação devem ser empreendidas para melhorar um pavimento ou de apenas realizar a manutenção da sua qualidade de rodagem atual é geralmente ditada por limitações orçamentárias. Medidas de manutenção de curto prazo podem ser extremamente eficazes em relação aos custos

A recuperação de pavimentos é às vezes postergada até que seja combinada com um trabalho de melhoria para incrementar a geometria da estrada e adicionar pistas. Cada decisão de recuperação precisa ser empreendida independentemente e no contexto da malha rodoviária como um todo. Porém, não fazer nada e deixar que o pavimento se deteriore é geralmente a pior decisão devido à taxa exponencial de deterioração com o passar do tempo.

1.6 Opções de recuperação

Normalmente existem muitas opções disponíveis para a recuperação de uma estrada deteriorada, sendo às vezes difícil definir qual é a melhor. Entretanto, a resposta a essas duas questões importantes que devem ser feitas desde o início irá auxiliar na seleção da opção “correta”, ou seja, aquela com a melhor relação de custo e benefício no atendimento das necessidades do proprietário da estrada. As duas perguntas importantes são:

- o que realmente tem de errado no pavimento existente? Uma pesquisa que compreenda uma vistoria combinada com alguns ensaios básicos (ex.: medições de deflexão) normalmente será suficiente para entender o mecanismo de deterioração. É muito importante definir se a deterioração está confinada à capa (camadas superiores do pavimento) ou se existe algum problema estrutural; e a segunda é
- o que o órgão responsável pela estrada realmente quer e o que ele pode investir? Um projeto de vida útil de 15 anos é esperado ou um investimento menor de capital é previsto que trate da taxa atual de deterioração e mantenha o pavimento por mais cinco anos?

As respostas a essas duas perguntas restringirão as opções de recuperação a um grupo que somente inclua as opções com uma boa relação de custo e benefício no contexto da natureza do problema e do tempo. A separação da natureza do problema em duas categorias (superfície e estrutura) e no tempo (curto ou longo prazo) simplifica a seleção da melhor opção.

Outra questão importante que afeta a decisão é a praticidade de vários métodos de recuperação. O gerenciamento do trânsito, as condições climáticas e a disponibilidade de recursos podem ter uma influência significativa sobre como o projeto é executado, impedindo certas opções.

Todo esse trabalho atende a um objetivo único: definir a solução com a melhor relação de custo e benefício ao problema no contexto do ambiente do projeto.

Observação:

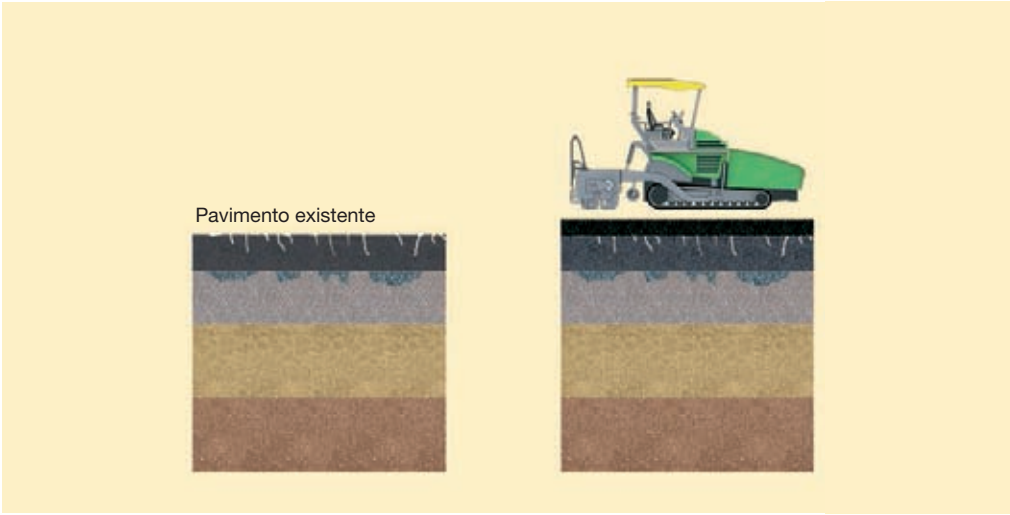
- O projeto de recuperação deve tratar da causa-raiz de deterioração com uma boa relação entre custo e benefício.

1.6.1 Recuperação superficial

As medidas de recuperação superficial tratam de problemas que são confinados à parte superior do pavimento, normalmente na camada de 50 a 100 mm da parte superior. Esses problemas estão normalmente relacionados ao envelhecimento do betume e a rachaduras que se iniciam na capa devido a forças térmicas.

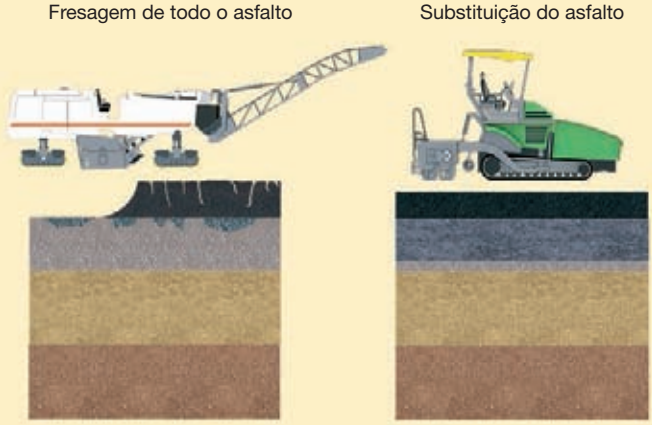
Os métodos mais frequentemente utilizados para lidar com esse tipo de problema incluem:

- **Recapeamento asfáltico sobreposto.** Pavimentação com uma camada fina (40 – 50 mm) de asfalto quente sobre a superfície existente. Essa é a solução mais simples para problemas superficiais uma vez que o tempo necessário para a conclusão da obra é curto e existe um impacto mínimo aos usuários da estrada. Ligantes modificados são geralmente usados no asfalto para a melhoria do desempenho, assim aumentando a vida útil do recapeamento. Rachaduras ativas na capa existente rapidamente serão refletidas pelo recapeamento e, assim, precisam ser identificadas e tratadas pela aplicação de consertos que aliviem a tensão ou remendos. O recapeamento repetido, entretanto, aumenta as elevações da camada de rolamento que podem causar problemas de escoamento e acesso.



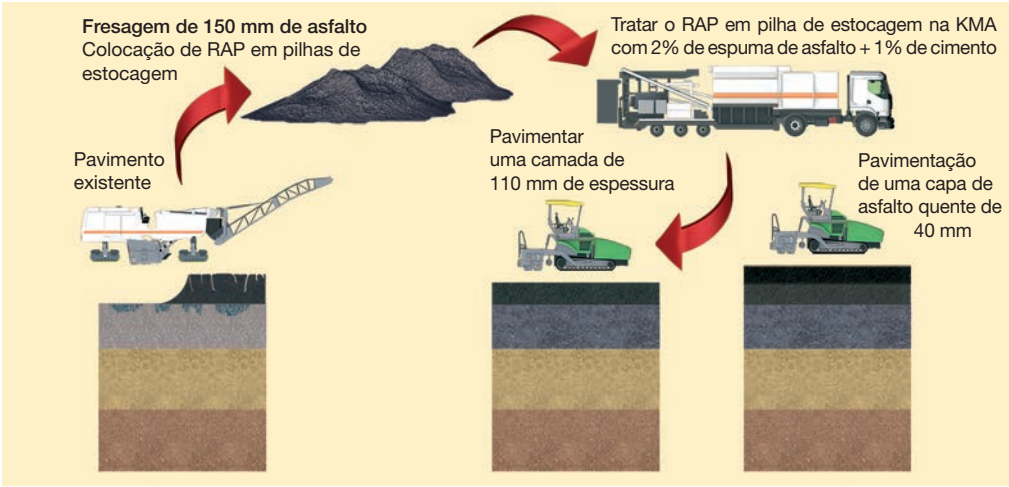
Recapeamento asfáltico sobreposto

- **Fresagem e substituição.** Esse método remove a camada rachada de asfalto e a substitui com asfalto quente novo, normalmente com um ligante modificado. O processo é relativamente rápido devido às altas capacidades de produção de fresadoras modernas. O problema é retirado com a camada de asfalto e os níveis do pavimento são mantidos.

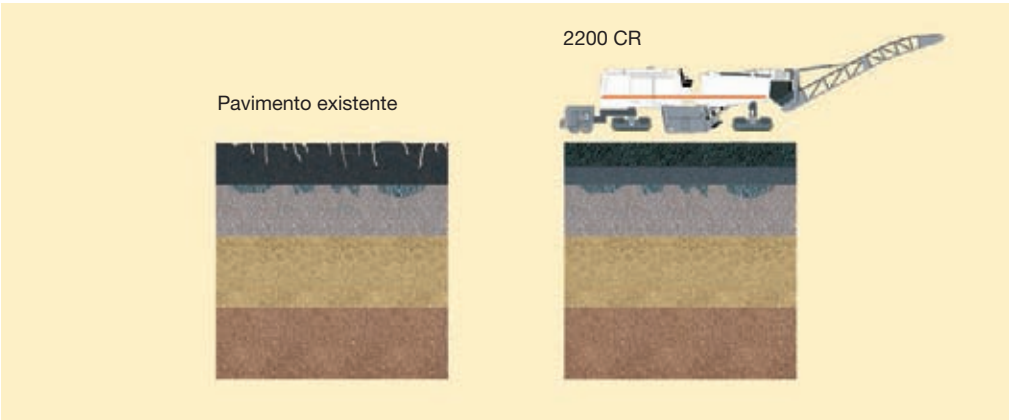


Fresagem e substituição

Reciclagem. Uma camada relativamente fina (100 mm – 150 mm) de material asfáltico com base no pavimento existente. Essa reciclagem pode ser realizada por “implante”, com o transporte do material fresado até uma usina misturadora a frio KMA 220, ou in situ usando uma 2200 CR ou WR 4200.


Fresagem de 150 mm de asfalto
Colocação de RAP em pilhas de estocagem
Tratar o RAP em pilha de estocagem na KMA com 2% de espuma de asfalto + 1% de cimento
Pavimento existente
Pavimentar uma camada de 110 mm de espessura
Pavimentação de uma capa de asfalto quente de 40 mm

Reciclar a camada superior de 150 mm



Reciclar os 100 mm da parte superior

1.6.2 Recuperação estrutural

A recuperação para lidar com problemas na estrutura do pavimento é normalmente tratada como uma solução de longo prazo. Ao tratar de problemas estruturais, devemos lembrar que é a estrutura do pavimento que está deteriorada; raramente são os materiais da estrutura. Além disso, a melhoria de um pavimento existente com o fortalecimento da estrutura (ex.: melhoria de uma via existente de cascalho com a adoção de asfaltamento) pode ser considerada como uma forma de recuperação.

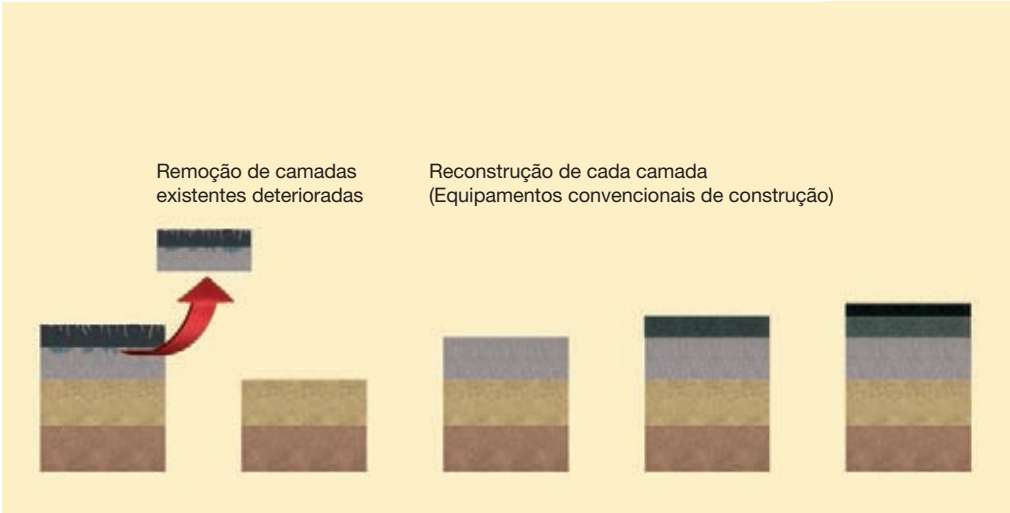
O adensamento (ou compactação) de materiais granulares é, na verdade, uma forma de melhoria, já que a densidade superior de um material natural gera melhores características de resistência. Entretanto, as consequências do adensamento e a deformação resultante podem gerar problemas que se manifestam nas camadas superiores, principalmente se essas camadas forem construídas com materiais ligados.

Como uma regra geral, a recuperação estrutural deve ter como objetivo a maximização do valor de recuperação do pavimento existente. Isso significa que os materiais adensados não devem sofrer alterações. A ação de compactação contínua do trânsito leva muitos anos para alcançar esse estágio, sendo que os benefícios que essas altas densidades proporcionam devem ser utilizados sempre que possível.

Várias opções conhecidas de recuperação estrutural incluem:

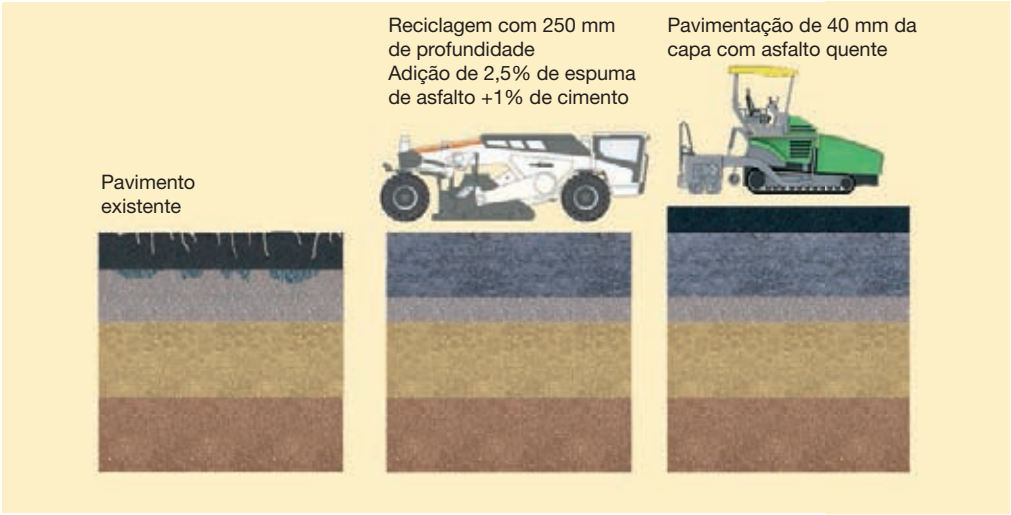
- **Reconstrução total.** Essa é geralmente a opção preferencial quando a recuperação é combinada com um trabalho de melhoria que exija mudanças significativas no alinhamento da estrada. Essencialmente, a reconstrução pressupõe “jogar fora e começar de novo”. Em situações de altos volumes de trânsito, é geralmente preferível construir uma nova instalação em um alinhamento separado, assim evitando problemas de acomodação do trânsito.

- **Construção de camadas adicionais** (com materiais granulares tratados ou não e/ou asfalto) sobre a capa existente. Camadas espessas de asfalto sobrepostas são geralmente a solução mais fácil para resolver um problema estrutural com altos volumes de trânsito. Entretanto, como descrito anteriormente, um aumento das elevações da capa geralmente gera



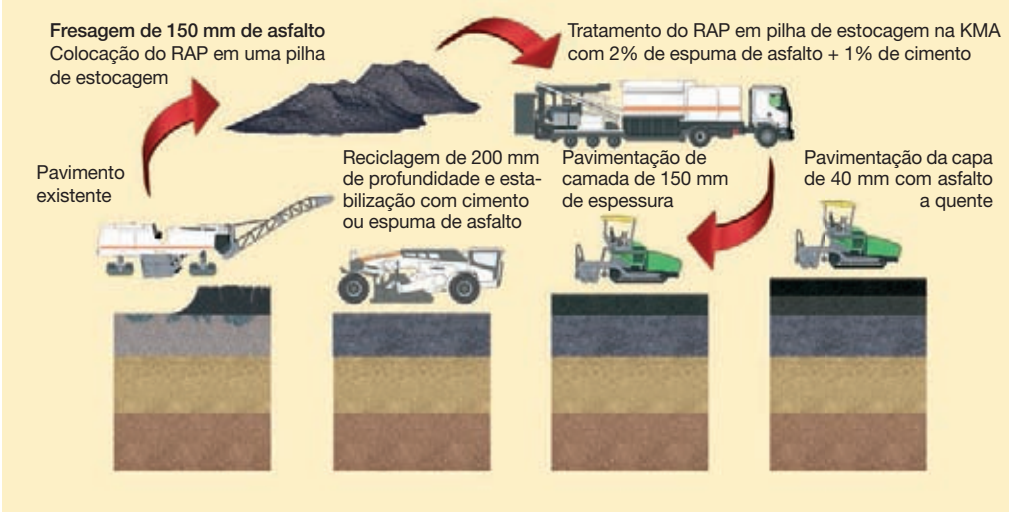
Reconstrução total

Reciclagem profunda na profundidade do pavimento onde o problema ocorre, assim criando uma camada nova, espessa e homogênea que pode ser fortalecida pela adição de agentes estabilizadores. Outras camadas podem ser acrescidas sobre a camada reciclada onde o pavimento será melhorado significativamente. Agentes estabilizadores são geralmente adicionados ao material reciclado, principalmente no caso em que o material no pavimento existente é marginal e requer fortalecimento. A reciclagem objetiva a recuperação máxima do pavimento existente. Além de recuperar o material nas camadas superiores, a estrutura do pavimento abaixo do nível da reciclagem deve permanecer intacta.


Pavimento existente
Reciclagem com 250 mm de profundidade
Adição de 2,5% de espuma de asfalto +1% de cimento
Pavimentação de 40 mm da capa com asfalto quente

Reciclagem profunda

Combinação de dois métodos de reciclagem, in situ e na usina. Essa opção possibilita que uma grande profundidade de pavimento existente seja tratada, exigindo que uma parte superior do pavimento seja inicialmente removida e colocada em uma pilha de estocagem temporária. O material subjacente é reciclado/estabilizado no local. O material colocado na pilha de estocagem temporária é então tratado na usina e pavimentado sobre a camada reciclada no local, assim alcançando uma maior capacidade estrutural. A espessura da camada pavimentada pode ser selecionada para atender aos requisitos de nível final da superfície. Por exemplo, onde os níveis existentes da superfície devem ser mantidos depois da recuperação e uma camada de rolamento com espessura de 40 mm for exigida, a espessura de pavimentação da camada estabilizada superior será reduzida em 40 mm para possibilitar que os níveis finais da superfície se ajustem aos níveis anteriores à recuperação.


Fresagem de 150 mm de asfalto
Colocação do RAP em uma pilha de estocagem
Tratamento do RAP em pilha de estocagem na KMA com 2% de espuma de asfalto + 1% de cimento
Pavimento existente
Reciclagem de 200 mm de profundidade e estabilização com cimento ou espuma de asfalto
Pavimentação de camada de 150 mm de espessura
Pavimentação da capa de 40 mm com asfalto a quente

Reciclagem com duas partes

O objetivo de se considerar várias opções de recuperação de pavimentos é definir a solução com a melhor relação de custo e benefício. Este manual tem como objetivo apresentar informações suficientes e uma abordagem de projeto que possibilite que a reciclagem seja incluída na lista de tais opções. As avaliações econômicas das diferentes opções ajudarão a identificar a solução ideal, como será discutido no capítulo seguinte.

2 Recuperação do pavimento

2.1	Geral	41
2.2	Recuperação do pavimento: procedimento de investigação e projeto	42
2.3	PASSO 1: Coleta de dados/informações disponíveis ao processo	44
2.3.1	Informações sobre o pavimento existente (histórico)	45
2.3.2	Tráfego do projeto	46
2.4	PASSO 2: Investigações preliminares	48
2.4.1	Definição de trechos uniformes	49
2.4.2	Inspeção visual	52
2.4.3	Reavaliação de trechos uniformes	54
2.5	PASSO 3: Investigações detalhadas	55
2.5.1	Escavação de poços de ensaio	55
2.5.2	Testes de laboratório	56
2.5.3	Extração de corpos de prova	57
2.5.4	Sondas de penetrômetro dinâmico de cone (DCP)	58
2.5.5	Análise de medições de deflexão	60
2.5.6	Medições da profundidade de trilhas de roda	60
2.5.7	Síntese de todos os dados disponíveis	61
2.6	PASSO 4: Opções preliminares do projeto de recuperação do pavimento	62
2.6.1	Abordagem do projeto do pavimento	62

2.6.2	Métodos de projetos de catálogos	63
2.6.3	Método de número estrutural	63
2.6.4	Método do número do pavimento	64
2.6.5	Métodos de projeto mecanicista	66
2.6.6	Métodos com base em deflexão	67
2.6.7	Resumo de abordagens do projeto do pavimento	67
2.7	PASSO 5: Projeto de mistura de laboratório	68
2.8	PASSO 6: Finalização das opções do projeto do pavimento	70
2.9	PASSO 7: Análises econômicas	71

Como explicado no capítulo anterior, os pavimentos se deterioram com o tempo e com o uso. Ao final da vida útil do pavimento, a taxa de deterioração da qualidade de rodagem aumenta devido a deformações, rachaduras, buracos e outros sintomas de deterioração. Os esforços necessários para a manutenção da integridade da superfície e de um nível adequado de qualidade tendem a aumentar significativamente, até chegar ao ponto em que faz mais sentido, do ponto de vista econômico, recuperar todo o pavimento em vez de tratar áreas localizadas de deterioração. Embora não haja diretrizes conclusivas e cada estrada tenha suas características específicas, o consenso geral aponta que alcançados 15% da área superficial com pequenos consertos, é mais econômico recuperar todo o trecho da estrada que continuar aplicando remendos de forma ad hoc.

A saturação com pequenos consertos indica o final da vida útil do pavimento

2.1 Geral

A recuperação de pavimentos é o termo utilizado para descrever o trabalho necessário para restaurar uma estrada deteriorada e recuperar a integridade estrutural do pavimento. Se uma estrada for projetada e construída adequadamente e se intervenções de manutenção de rotina e recapeamento forem empreendidas em tempo hábil, a necessidade de recuperação pode ser postergada até que o pavimento alcance uma condição terminal devido à deterioração estrutural. Entretanto, na prática, essas atividades de manutenção e recapeamento geralmente não são realizadas, o que resulta na necessidade de recuperação prematura do pavimento em relação ao originalmente previsto. Além disso, a recuperação de pavimentos é normalmente realizada com a inclusão de melhorias como o fortalecimento do pavimento e/ou melhorias geométricas necessárias para acomodar maiores volumes de trânsito.

Este capítulo descreve os vários procedimentos constantes no trabalho de recuperação de pavimentos. Eles serão explicados e diretrizes serão explicitadas no sentido de apresentar uma visão ampla e prática sobre o processo envolvido (e por vezes complexo) que se tornou, recentemente, uma área de especialização no campo da Engenharia de Pavimentos. Essas explicações e diretrizes certamente não são exaustivas, sendo necessária referência à literatura incluída na Bibliografia (após o Capítulo 6) em caso de necessidade de informações mais detalhadas.

Os vários procedimentos do trabalho de recuperação de pavimentos incluem a coleta de informações pertinentes (ex.: dados de tráfego), a condução de pesquisas e ensaios para identificar e definir a composição e condição das várias camadas da estrutura do pavimento existente (ex.: medições de deflexão), o resumo e a interpretação de todos os dados disponíveis para possibilitar que opções alternativas de projeto atendam à vida útil do projeto (sua capacidade estrutural) a ser formulado e, finalmente, a decisão sobre qual é a melhor opção. Embora esses procedimentos sejam comuns a todos os trabalhos de recuperação de pavimentos, o foco deste capítulo recairá sobre a identificação e o entendimento de todos os materiais da estrutura superior do pavimento e o seu potencial de reciclagem.

Um fluxograma será apresentado com o objetivo de ilustrar os vários procedimentos e métodos utilizados no trabalho de recuperação de pavimentos. Os métodos normalmente usados na investigação de pavimentos deteriorados também são apresentados. Os diferentes métodos usados no projeto de pavimentos são descritos, principalmente os mais adequados aos pavimentos recuperados pela reciclagem.

2.2 Recuperação do pavimento: procedimento de investigação e projeto

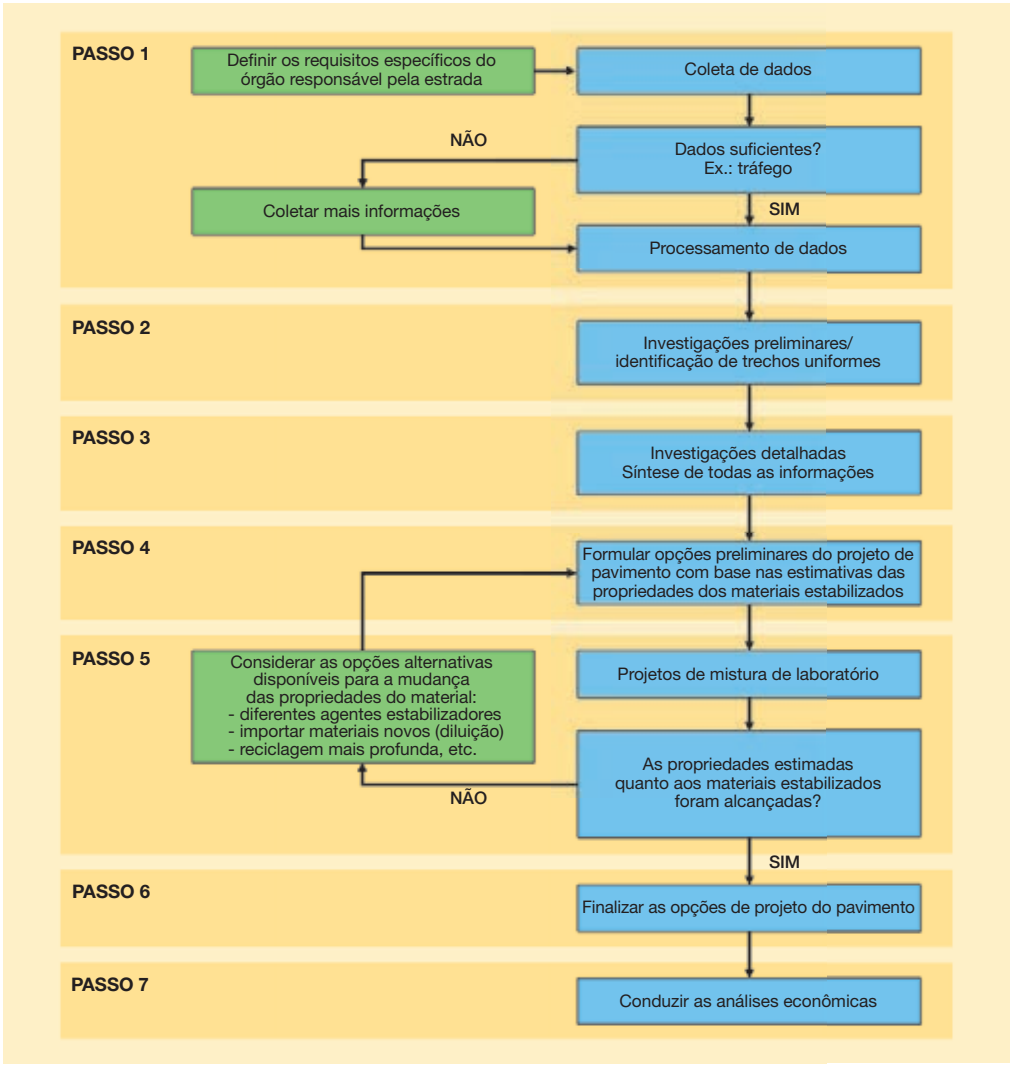
A necessidade de recuperação geralmente surge pela constatação de um nível inaceitável de deterioração que se reflete nas más condições da capa (ex.: qualidade de rodagem ruim, desenvolvimento de buracos, etc.), frequentemente destacadas e priorizadas pelo uso de um Sistema de Gerenciamento de Pavimento adequado. Depois de identificar uma estrada que necessita de recuperação, a investigação e o procedimento de projeto de todo o pavimento devem ser desenvolvidos para a definição da solução de recuperação mais adequada.

Os principais objetivos da investigação de um pavimento existente são determinar a composição da estrutura do pavimento, obter um entendimento a respeito do comportamento dos materiais nas várias camadas e estabelecer a causa da deterioração que aumentou a demanda por medidas de manutenção.

O fluxograma apresentado a seguir se aplica a todas as obras de recuperação e pode ser ajustado de acordo com as necessidades específicas. As várias atividades estão divididas em sete passos sequenciais:

Passo 1: Coleta de informações disponíveis
Passo 2. Investigações preliminares e identificação de trechos uniformes
Passo 3. Investigação detalhada de cada trecho uniforme e síntese de todos os dados
Passo 4. Opções preliminares do projeto do pavimento com base nas estimativas das propriedades dos materiais estabilizados
Passo 5. Projetos de mistura de laboratório para a definição das propriedades de materiais estabilizados
Passo 6. Finalização do projeto do pavimento
Passo 7. Análises econômicas e outras análises para a indicação da solução ideal

Segue a descrição detalhada de cada um desses passos.


PASSO 1
Definir os requisitos específicos do órgão responsável pela estrada
Coleta de dados
NÃO
Dados suficientes? Ex.: tráfego
Coletar mais informações
SIM
Processamento de dados
PASSO 2
Investigações preliminares/ identificação de trechos uniformes
PASSO 3
Investigações detalhadas Síntese de todas as informações
PASSO 4
Formular opções preliminares do projeto de pavimento com base nas estimativas das propriedades dos materiais estabilizados
PASSO 5
Considerar as opções alternativas disponíveis para a mudança das propriedades do material:
- diferentes agentes estabilizadores
- importar materiais novos (diluição)
- reciclagem mais profunda, etc.
Projetos de mistura de laboratório
As propriedades estimadas quanto aos materiais estabilizados foram alcançadas?
NÃO
SIM
PASSO 6
Finalizar as opções de projeto do pavimento
PASSO 7
Conduzir as análises econômicas

2.3 PASSO 1: Coleta de dados/informações disponíveis ao processo

Ao começo de qualquer trabalho de recuperação de pavimento, os responsáveis pela elaboração do projeto devem ter um entendimento claro sobre os requisitos, em termos de:

- Vida útil do projeto. A exigência é de uma vida útil curta ou longa?
- Propriedades funcionais da estrada recuperada (ex.: requisitos específicos de qualidade de rodagem, aderência e níveis de ruído)
- Orçamento disponível. O nível de financiamento disponível para as obras de recuperação e para as medidas de manutenção de rotina que serão necessárias durante a sua vida útil.

Esses requisitos fornecem ao engenheiro responsável o escopo e os limites do projeto. A fase de investigação começa com a coleta de todas as informações disponíveis sobre o pavimento existente. Essas informações se dividem em duas grandes categorias descritas abaixo:

- informações a título de histórico; e
- dados de tráfego para definir os requisitos de sua capacidade estrutural.

2.3.1 Informações sobre o pavimento existente (histórico)

Todas as informações disponíveis devem ser coletadas e analisadas para contextualizar o projeto e levar em consideração de forma precoce o que pode ser esperado logo no início das investigações de campo. Mediante a disponibilidade, registros de construção e manutenção podem fornecer informações valiosas sobre:

- detalhes do pavimento que foi originalmente construído;
- a espessura das camadas construídas;
- detalhes dos materiais utilizados na construção das camadas originais assim como qualquer material usado em medidas de recuperação e melhoria;
- resultados de testes de controle de qualidade durante a construção; e
- dados geológicos ao longo da rota.

Além disso, o máximo de informações possível deve ser obtido sobre os materiais de construção disponíveis localmente. O tipo, a qualidade e a quantidade de materiais que podem ser obtidos tanto de fontes comerciais e locais de empréstimo anteriormente abertos bem como pedreiras devem ser investigados para possível utilização nas obras de recuperação. Além disso, o local e a distância do canteiro de obras em relação a qualquer usina de asfalto estabelecida devem ser definidos.

Os registros meteorológicos da estação meteorológica mais próxima devem ser obtidos e analisados para a definição das estações mais adequadas para o tipo de construção previsto.

A proximidade de materiais disponíveis localmente irá influenciar as opções de recuperação

2.3.2 Tráfego do projeto

O volume e o tipo de tráfego que uma estrada deve suportar durante a sua vida útil ditarão as suas exigências estruturais. Por isso, os engenheiros precisam de acesso às estatísticas de tráfego (em termos de número de veículos, configuração e massa de eixos) para definir os requisitos estruturais das obras de recuperação.

Requisitos de capacidade estrutural
Os requisitos estruturais de um pavimento são referidos como a sua "capacidade estrutural", que define a carga que o pavimento pode suportar antes de se deteriorar até alcançar o estágio de "condição de falha". A capacidade estrutural é expressa em termos de repetições de "carga equivalente" com a carga transportada em um único eixo expressa em toneladas (ou kN), normalmente de acordo com a carga máxima por eixo, que varia de 8 a 13 toneladas dependendo do país. As diferentes cargas por eixo são relacionadas a esse valor máximo para a obtenção de um valor "equivalente". Por exemplo, no caso de uma carga máxima admitida por eixo de 8 toneladas, uma única carga por eixo de 4 toneladas estaria entre 0,1 e 0,3 de "cargas por eixo equivalente de 80 kN", dependendo da função usada para relacionar uma carga de 4 toneladas a uma carga equivalente de 8 toneladas. (Essa função relacional também é conhecida como o "fator de dano").

O termo "carga equivalente de eixo-padrão (ESAL)" originou-se nos Ensaios Rodoviários da AASHO realizados nos EUA durante o final da década de 1950, época que marcou o advento da engenharia de pavimentos. A carga por eixo referida como "padrão" da medida ESALs é de 8 toneladas ou 80 kN e, conforme explicado acima, diferentes cargas por eixo são relacionadas a um número equivalente de cargas por eixo de 80kN com capacidade estrutural de um pavimento expressa em termos de milhões de ESALs.

Faixa de tráfego composta por diferentes tipos de veículos

Se a carga admitida por eixo for diferente de 8 toneladas (ex.: 11 toneladas na Alemanha), a capacidade estrutural do pavimento será normalmente definida em termos de repetições de "equivalências de carga por eixo" com a carga por eixo declarada em kN (ex.: 25 milhões de equivalências de cargas por eixo de 110 kN). Adotando-se um fator de dano adequado, o número de cargas equivalentes de 110 kN pode ser convertido ao valor em ESALs (ex.: 25 milhões de cargas por eixo equivalente de 110 kN seriam traduzidos em aproximadamente 90 milhões de ESALs).

A capacidade estrutural é geralmente referida como o "tráfego do projeto" ou a "capacidade de carga" de um pavimento e, desde que ambos se refiram a milhões de repetições de carga por eixo equivalente, esses termos são sinônimos.

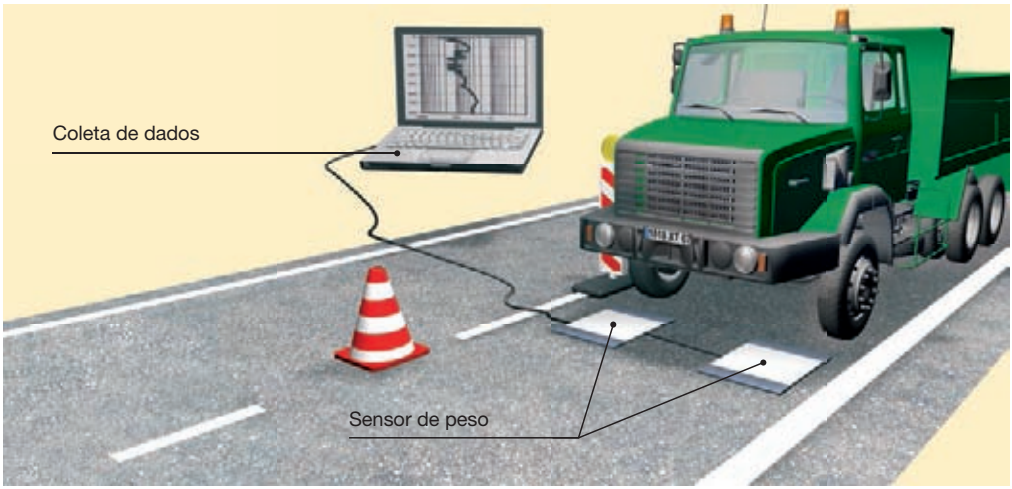
Observação:

- Tráfego do projeto
  Dados precisos do tráfego e informações sobre o seu crescimento são essenciais

Os pavimentos são, portanto, projetados para atender a uma capacidade estrutural específica. Embora a vida útil de um projeto geralmente seja expressa em anos, os pavimentos são na verdade projetados para suportar um número de repetições de carga previsto durante esse período. Assim, qualquer mudança imprevista dessa carga de tráfego estimada afetará a vida útil do projeto. Esse é um dos aspectos mais fundamentais da engenharia de pavimentos e, por ser tão importante, uma explicação completa será incluída no Apêndice 2, intitulado "Definição da capacidade estrutural com base nas informações do trânsito".

Coleta de mais informações sobre o tráfego
No caso de dados de tráfego insuficientes, principalmente no projeto de recuperação de pavimentos para tráfego pesado, informações adicionais devem ser obtidas. Contagens de trânsito devem ser realizadas e dados de peso em movimento devem ser obtidos para a estimativa do percentual de veículos pesados que utilizam a estrada atualmente, assim como o número médio de eixos por veículo pesado e a massa média transportada em cada eixo. Essas informações devem ser complementadas sempre que possível com informações obtidas dos postos de pesagem (inclusive os resultados de qualquer pesquisa sobre a pressão de pneus).

Sempre devemos levar em consideração que as informações usadas para calcular a capacidade estrutural se baseiam em pressupostos relativos a taxas de crescimento, fatores de dano e outros dados que só podem ser estimados. Assim, é importante realizar análises de sensibilidade para entender a consequência da variação desses parâmetros estimados.



Posto de pesagem para medir e registrar as cargas por eixo

2.4 PASSO 2: Investigações preliminares

Antes do início de pesquisas de campo ou investigações, é essencial que a camada de rolamento existente seja marcada precisamente com um sistema adequado de referência (normalmente o comprimento ou a distância em km (ex.: km 121 + 400) são adotados). É normal pintar de maneira destacada a cada 20 m na linha central ou borda do pavimento e escrever a marcação das distâncias a cada 100 m. Essas marcas são geralmente usadas como a principal referência para todas as pesquisas e locais de ensaios.

Os pavimentos rodoviários são raramente uniformes ao longo de grandes distâncias. Tanto a geologia subjacente como os materiais usados na construção das camadas individuais variam ao longo da estrada. Todas as estradas são compostas por uma série de diferentes trechos de relativa uniformidade, sendo que o comprimento de cada trecho será diferente. Esses trechos são conhecidos como “trechos uniformes” e podem ter de apenas algumas centenas de metros até vários quilômetros. Os trechos uniformes são identificados visualmente por mudanças nos padrões de deterioração. Medições de deflexão também podem ser úteis na identificação de diferenças na estrutura subjacente do pavimento.

2.4.1 Definição de trechos uniformes

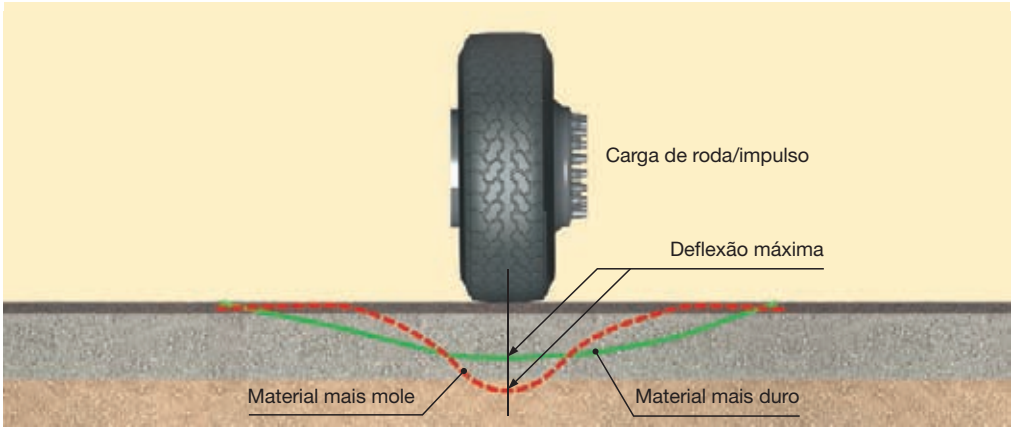
Um dos principais objetivos das investigações preliminares é a identificação de trechos uniformes. Isso é geralmente realizado analisando-se os históricos da construção disponíveis, analisando-se qualquer dado de deflexão e conduzindo-se uma vistoria ampla. Sintomas semelhantes de deterioração e/ou de medições de deflexão indicam condições semelhantes na estrutura subjacente do pavimento. Essas informações são usadas para identificar os limites entre os diferentes trechos uniformes e os tipos de deterioração (indicando o modo de falha). A seguir apresenta-se a descrição de como isso é realizado na prática.

Método de deflexão
Quando uma carga é aplicada à superfície de uma estrada, o pavimento sofre uma deflexão. As deflexões podem ser medidas com a aplicação de uma carga sobre o pavimento, por um impulso (peso em queda) ou por uma carga de roda conhecida que simule um veículo pesado. A magnitude da deflexão que ocorre mediante uma carga, assim como a forma da bacia de deflexão produzida pela carga, fornece um meio útil de avaliação das propriedades in situ do pavimento.

Vários métodos de medição da deflexão do pavimento foram desenvolvidos, principalmente para o uso como indicadores da condição estrutural e capacidade de carga do pavimento. Os mais conhecidos são a Viga de Benkelman e o Deflectômetro de impacto (FWD).

Medição do pavimento usando o FWD

O esboço abaixo ilustra as bacias típicas de deflexão medidas em dois pavimentos.



Bacia de deflexão típica

Normalmente, os órgãos responsáveis pela estrada realizam pesquisas de deflexão com intervalos de 3 a 5 anos nas principais estradas de sua malha para alimentar o seu Sistema de Gerenciamento de Pavimento. Sempre que há disponibilidade, essas informações são valiosas para uma definição inicial dos trechos uniformes com o uso de técnicas estatísticas simples (análises de soma cumulativa) para identificar onde ocorre a mudança. Os valores de soma cumulativa de deflexão máxima são calculados com o uso da fórmula abaixo:

$$S_i = (\delta_i - \delta_{médio}) + S_{i-1} \quad \text{(equação 2,1)}$$

em que S_i = valor da soma cumulativa no local i;
δ_i = deflexão máxima no local i; e
$\delta_{médio}$ = média da deflexão máxima para todo o trecho.
S_{i-1} = valor da soma cumulativa no local antes do local i

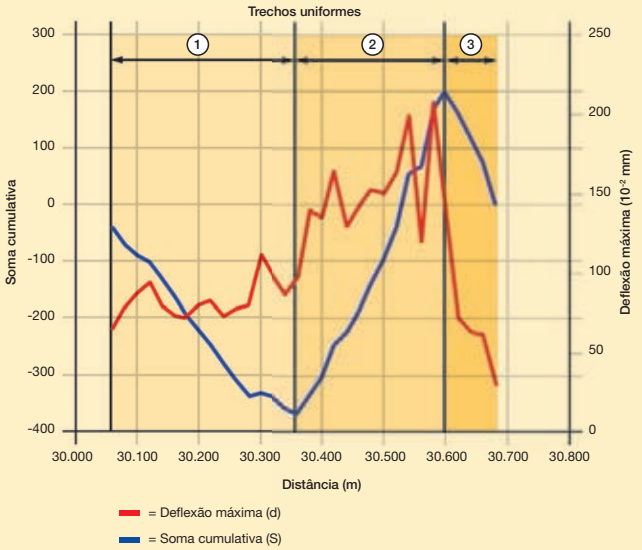
O valor da soma cumulativa é diagramado em cada local respectivo, normalmente junto com o valor máximo de deflexão representado no mesmo gráfico, conforme demonstrado na representação ao lado. Uma inclinação constante relativa na representação da soma cumulativa indica trechos com reações do pavimento semelhantes ou um trecho uniforme.

Observação: O método de soma cumulativa não é limitado à deflexão máxima. Esse método é geralmente usado com outros índices de deflexão, tais como o índice de curvatura superficial (SCI).

Outros métodos

Quando não há dados de deflexão disponíveis, os trechos uniformes devem ser identificados por outros meios. Informações da construção (quando houver disponibilidade) são geralmente usadas como uma diretriz inicial, complementadas por uma avaliação visual detalhada, conforme descrito a seguir.

Distância (m)	Deflexão máxima (d)	Soma cumulativa (S)
30.060	64,80	-41,14
30.080	76,70	-70,38
30.100	86,60	-89,71
30.120	94,00	-101,65
30.140	79,10	-128,49
30.160	72,70	-161,73
30.180	71,30	-196,36
30.200	79,50	-222,80
30.220	82,40	-246,34
30.240	71,70	-280,58
30.260	76,80	-309,71
30.280	78,90	-336,75
30.300	110,40	-332,29
30.320	98,70	-339,53
30.340	86,70	-358,76
30.360	97,40	-367,30
30.380	139,60	-333,64
30.400	134,70	-304,88
30.420	164,00	-246,81
30.440	129,50	-223,25
30.460	142,50	-186,69
30.480	152,30	-140,33
30.500	150,10	-96,16
30.520	163,50	-38,60
30.540	198,90	54,36
30.560	119,60	68,02
30.580	208,60	170,69
30.600	132,80	197,55
30.620	72,10	163,71
30.640	63,20	120,98
30.660	61,10	76,14
30.680	29,80	0,00
Média (D)	105,94	



Identificação dos trechos uniformes

Entretanto, quando a capacidade estrutural exigida do pavimento ultrapassar 10 milhões de ESALs, será sempre aconselhável a realização de um levantamento de FWD no começo.
Além de identificar os trechos uniformes, as informações decorrentes desse levantamento são valiosas para a avaliação estatística de várias propriedades in situ do pavimento (consultar Seção 2.5.5).

Observação:

- Métodos de soma cumulativa podem ser usados para identificar trechos uniformes com base nas medições de deflexão ou outras informações pertinentes (ex.: valor do ensaio CBR do subleito) coletadas ao longo da via.

2.4.2 Inspeção visual

Inspeções visuais são realizadas percorrendo-se a estrada e registrando-se todas as características relevantes que podem ser observadas ou detectadas. São anotações detalhadas de toda a deterioração evidente no nível superficial por toda a largura do pavimento assim como outras observações com relação ao escoamento, mudanças geológicas e características geométricas (ex.: inclinação, curvas acentuadas, cortes e aterros altos). O modo e o tipo de deterioração que podem ser reconhecidos durante a inspeção são normalmente classificados nas categorias descritas abaixo.

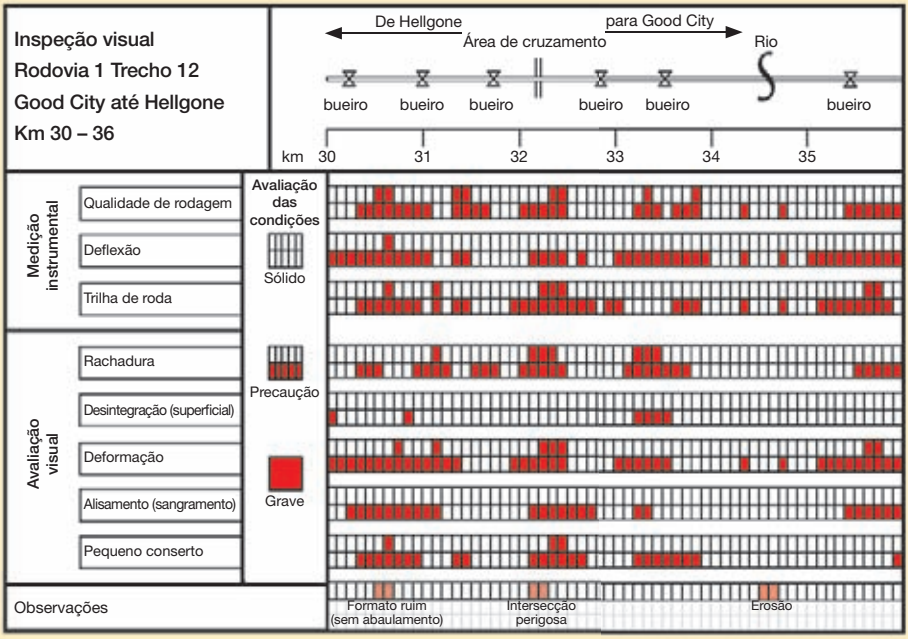
Observação:

- Os dados da inspeção visual fornecem pistas valiosas em relação à causa da deterioração

Modo da deterioração	Tipo da deterioração	Descrição
Dano superficial	Dano ambiental; Dano do tráfego	Esfacelamento, perda de pedras; Rachaduras térmicas; Trilhas de rodas (asfalto); Descascamento, sangramento, polimento
Dano estrutural	Deformação permanente; Rachadura; Danos avançados	Trilhas de rodas; Deslocamento lateral; Trilhas de rodas longitudinais; Couro de jacaré; Outras (transversais, etc.) Buracos, consertos, etc.
Condição funcional	Escoamento; Qualidade de rodagem	Erosão, desgastes, etc. Quebra de bordas; Ondulações, rugosidades, etc.

Os diferentes modos e tipos de deterioração do pavimento são registrados em relação a cada ocorrência em termos de local, gravidade e frequência. As inspeções visuais fornecem pistas valiosas em relação às causas da deterioração do pavimento já que os padrões da falha tendem a ser destacados quando todos os dados são resumidos em uma só planilha. Essa característica está ilustrada no exemplo apresentado ao lado.

Durante a inspeção visual, fotografias digitais da camada de rolamento são normalmente realizadas com intervalos regulares (± 250 m em ambos os sentidos), sendo registradas as características específicas (ex.: falha localizada). Além disso, vídeos são ferramentas eficientes para o registro de áreas de problemas relacionados ao tráfego que devem ser tratados por obras de recuperação (ex.: movimentos perigosos do tráfego).


Inspeção visual
Rodovia 1 Trecho 12
Good City até Hellgone
Km 30 – 36
De Hellgone
para Good City
Área de cruzamento
Rio
bueiro
bueiro
bueiro
bueiro
bueiro
bueiro
km
30
31
32
33
34
35
Medição instrumental
Qualidade de rodagem
Deflexão
Trilha de roda
Avaliação visual
Rachadura
Desintegração (superficial)
Deformação
Alisamento (sangramento)
Pequeno conserto
Avaliação das condições
Sólido
Precaução
Grave
Observações
Formato ruim (sem abaulamento)
Intersecção perigosa
Erosão

A principal diferença entre a deterioração superficial e estrutural é demonstrada graficamente a seguir.

Deterioração confinada à camada superficial

Deterioração em virtude de inadequação estrutural

2.4.3 Reavaliação de trechos uniformes

Os trechos uniformes definidos inicialmente a partir das análises de deflexão devem ser reavaliados com o uso de informações da inspeção visual, juntamente com todas as informações disponíveis (ex.: registros da construção). Esse processo possibilita uma definição mais precisa dos limites entre trechos uniformes e facilita a identificação de trechos com uma estrutura semelhante de pavimento.

2.5 PASSO 3: Investigações detalhadas

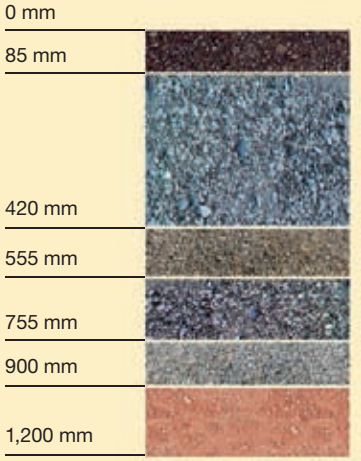
Para cada trecho uniforme, uma investigação detalhada é necessária para avaliar a estrutura do pavimento existente (componentes e modo da deterioração) e definir o suporte in situ do subleito. Testes e levantamentos normalmente são empregados em uma investigação detalhada.

2.5.1 Escavação de poços de ensaio

Poços de ensaio são, sem dúvida, a fonte mais importante de informações em relação à estrutura existente do pavimento. Além de adquirir a avaliação visual das diferentes camadas e materiais da estrutura do pavimento, os poços de ensaio fornecem a oportunidade de definir a condição in situ dos vários materiais para a coleta de amostras de cada camada para ensaios de laboratório (para a classificação dos materiais ou projetos de misturas de estabilização).

As informações seguintes podem ser definidas de maneira precisa a partir dos poços de ensaio:

- espessura de cada camada do pavimento;
- teor de umidade do material in situ de cada camada;
- densidade in situ do material de cada camada; e
- condições do material nas várias camadas (ex.: nível de rachadura, cimentação ou carbonatação de qualquer camada estabilizada por cimento).



Poço de ensaio

Exemplo de escavação de poço de ensaio e perfil (profundidade da superfície)

Um mínimo de dois poços de ensaio são normalmente escavados em cada trecho uniforme, um onde existe deterioração evidente e o outro onde não há deterioração. Os poços de ensaio são geralmente localizados na trilha de roda externa da faixa de trânsito e, às vezes, posicionados entre o acostamento e a faixa de trânsito. Os poços de ensaio são normalmente de 1 m de comprimento (por toda trilha de roda), 0,75 m de largura (ao longo da trilha de roda) e, no mínimo, 1 m de profundidade. Outras fendas mais rasas (de 0,5 m de largura) são geralmente escavadas por toda a largura da faixa de trânsito como forma de investigar a profundidade até onde a deformação se estende para definir a existência de alargamento do pavimento, assim como a localização de um limite entre o pavimento original e os pavimentos alargados.

Os poços de ensaio devem ser cuidadosamente escavados para que cada camada individual de diferentes tipos de material possa ser separada e retirada independentemente. Cada tipo de material encontrado é cuidadosamente retirado (normalmente manualmente) e empilhado separadamente ao lado da escavação para amostragem posterior. À medida que a escavação se desenvolver, ensaios de densidade e outros ensaios in situ podem ser realizados em cada camada sucessivamente à medida que ela for exposta.

Quando a escavação for concluída, o perfil do pavimento será cuidadosamente medido e registrado, conforme podemos ver na página anterior. Amostras de diferentes camadas são coletadas para ensaios de laboratório antes de aterrar o poço de ensaio.

Observação:

- Amostras representativas devem ser utilizadas para ensaios de laboratório

2.5.2 Ensaios de laboratório

As amostras dos poços de ensaio são analisadas no laboratório para definir a qualidade do material em cada uma das camadas assim como no subleito. O programa de ensaio deve incluir amostras de agregados que podem ser necessários para fazer a mistura com qualquer material reciclado in situ. Amostras representativas desses materiais de mistura devem ser obtidas dos mesmos poços de empréstimo e pedreiras que serão usados como fontes para a construção.

Alguns dos ensaios de laboratório normalmente realizados em amostras são: análise de peneiramento, limites de Atterberg e Índice de suporte Califórnia (CBR). Os resultados são usados principalmente para a classificação do material, ou seja, para fornecer uma indicação de parâmetros relevantes (tais como módulo de elasticidade) para o uso na análise da estrutura existente do pavimento. Os resultados também são usados para indicar a adequação do material para a estabilização e definir quais agentes estabilizadores são adequados.

2.5.3 Extração de corpos de prova

A extração de corpos de prova por perfuração rotacional através das camadas de materiais ligados é relativamente rápida e menos destrutiva que a escavação de poços de ensaio ou poços de inspeção. Desde que a recuperação total seja alcançada, os corpos de prova podem ser medidos para a definição precisa da espessura das camadas de materiais ligados (ex.: materiais estabilizados com asfalto e cimento). Mediante a necessidade, os corpos de prova recuperados das camadas de asfalto podem ser analisados em relação à composição volumétrica/propriedades de engenharia, e a resistência à compressão não confinada pode ser definida pela análise dos corpos de prova a partir das camadas de cimento.

Observação:

- O comprimento recuperável do corpo de prova se limita pela altura da sonda utilizada.
- Depois de definir a espessura das camadas ligadas das amostras retiradas, garanta a recuperação total (ou seja, garantindo que a amostra não tenha quebrado durante a escavação e/ou perfuração contínua até a parte inferior da camada ligada).
- Sondas de diâmetro superior (150 mm de diâmetro) são preferenciais, principalmente se o material ligado incluir agregados maiores que 19 mm.
- Materiais não ligados não podem ser recuperados e amostrados por sonda.

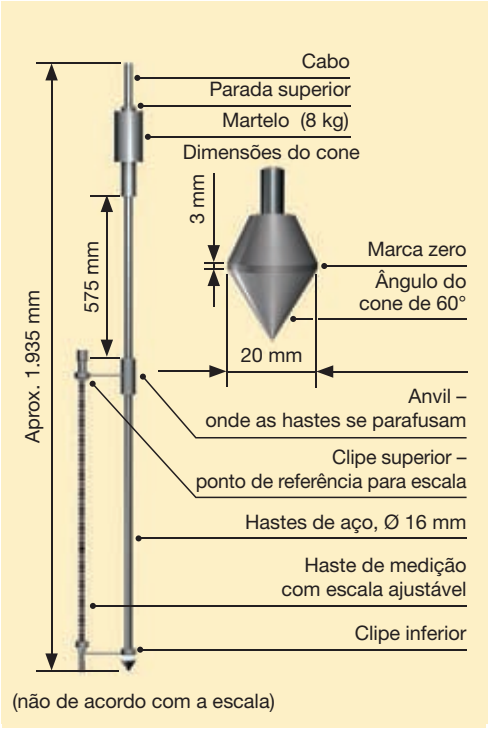
Extração de corpos de prova das camadas de material ligado

2.5.4 Sondas de penetrômetro dinâmico de cone (DCP)

O penetrômetro dinâmico de cone é um instrumento simples que consiste em uma haste de aço com uma ponta cônica de aço endurecido que é inserida no pavimento rodoviário com o uso de um bate-estaca de massa-padrão com queda a uma distância constante. A taxa de penetração, medida em mm/batida, fornece uma indicação da resistência de suporte in situ do material nas diferentes camadas de pavimento, sendo que uma mudança na taxa de penetração indica o limite entre as camadas. As sondas do penetrômetro dinâmico de cone são normalmente inseridas até profundidades de 800 mm ou mais profundamente em estruturas de pavimentos mais pesados. As taxas de penetração podem ser representadas e utilizadas para indicar a espessura das várias camadas e as propriedades do material in situ de cada camada.

As taxas de penetração do penetrômetro dinâmico de cone se correlacionam bem com o Índice de suporte Califórnia (CBR) em materiais relativamente finos e apenas de forma razoável com materiais mais graúdos (com densidade e teor de umidade in situ). As correlações da taxa de penetração com a resistência à compressão não confinada de materiais levemente cimentados também foram desenvolvidas. Além disso, a taxa de penetração do penetrômetro dinâmico de cone fornece uma orientação útil para o módulo de elasticidade dos materiais do pavimento in situ.

Uma vez que o coeficiente de variação, em geral, é relativamente alto, várias sondas de penetrômetro dinâmico de cone são normalmente necessárias para o alcance de uma confiabilidade estatística. As medições devem ser analisadas estatisticamente para o alcance de um valor de percentil relevante (normalmente o 20º percentil é usado para vias secundárias e o 5º percentil para rodovias principais).



Dimensões do penetrômetro dinâmico de cone

Medições da penetração do penetrômetro dinâmico de cone são normalmente realizadas uma vez a cada cinco batidas. Essas medições são analisadas com o uso de um programa de computador para indicar o CBR in situ, a resistência à compressão não confinada, o módulo de resiliência e a espessura da camada, conforme podemos ver na análise de exemplo ao lado.

Curva do penetrômetro dinâmico de cone

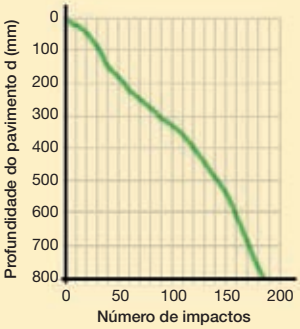
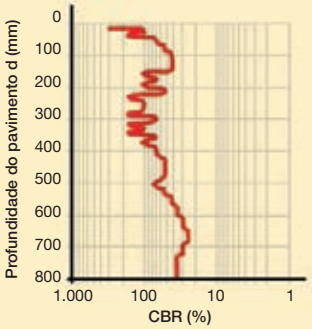
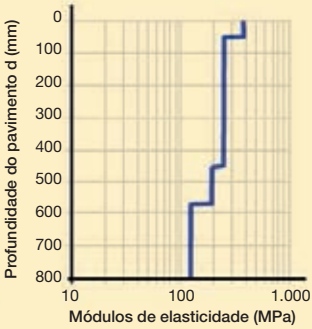


Diagrama da resistência da camada



Módulo de elasticidade



Às vezes surgem dificuldades com a tentativa de forçar o penetrômetro dinâmico de cone através de material graúdo ou ligado. Uma condição de recusa é normalmente definida por uma penetração < 1 mm a cada dois conjuntos sucessivos de 5 quedas do martelo (ou seja, < 2 mm medidos a cada 10 quedas do martelo). Se essa condição for encontrada durante a tentativa de forçar a sonda pela parte superior do pavimento, um buraco de 25 mm de diâmetro deve ser primeiramente perfurado através das camadas do material graúdo e/ou ligado, assim inserindo a sonda na profundidade inferior no pavimento onde o cone pode penetrar.

De forma alternativa, se os corpos de prova forem extraídos das camadas ligadas no pavimento superior, as sondas do penetrômetro dinâmico de cone podem começar a partir da parte inferior dos buracos dos corpos de prova. Com a aplicação desse procedimento, a água em excesso deve ser retirada do fundo do buraco do corpo de prova tão logo ele for extraído. Devemos considerar que a água utilizada para resfriar a sonda do corpo de prova durante a perfuração irá influenciar a penetração medida entre os primeiros 50 mm a 100 mm da sonda do penetrômetro dinâmico de cone.

2.5.5 Análise de medições de deflexão

Como apresentado na Seção 2.4.1, as medições de deflexão podem ser analisadas para fornecer informações in situ valiosas sobre os materiais na estrutura do pavimento. Além de ajudar no delineamento dos trechos uniformes, as medições de deflexão dentro de cada trecho uniforme podem ser analisadas estatisticamente, com um nível de confiabilidade adequado, sendo que a bacia de deflexão pode ser reavaliada (ex.: somente a bacia de deflexão do percentil 95º de um trecho uniforme específico é analisada).

As espessuras das camadas com base nas medições de campo e os valores dos módulos das camadas in situ indicados pelas sondas de penetrômetro dinâmico de cone devem ser usados como diretrizes para cada camada (principalmente o subleito) durante a reavaliação das bacias de deflexão. Os resultados dessas análises fornecem estimativas de valores de rigidez in situ para várias camadas de pavimento. Conforme discutido na Seção 2.6 a seguir, essas informações são necessárias para a modelagem do pavimento.

2.5.6 Medições da profundidade de trilhas de roda

As profundidades das trilhas de roda são medidas manualmente com uma borda reta posicionada transversalmente sobre as trilhas de roda em cada faixa de trânsito. A profundidade máxima da trilha de roda é registrada. As profundidades das trilhas de roda são medidas com o uso de um equipamento móvel sofisticado de vigilância rodoviária que emprega técnicas de medição a laser (ex.: ARAN – analisador rodoviário automático). A largura da trilha de roda na superfície do pavimento (também referida como o raio da trilha de roda) indica a fonte da deformação na estrutura do pavimento.

Trilhas de roda estreitas são geralmente causadas pela instabilidade nas camadas de asfalto enquanto trilhas de roda mais largas indicam a deformação permanente das camadas subjacentes. A correlação da profundidade da trilha de roda e a deflexão (medida exatamente no mesmo ponto) também ajuda a definir se a deformação está na estrutura superior ou inferior do pavimento.

Medição da profundidade do sulco em uma trilha de roda

Observação:

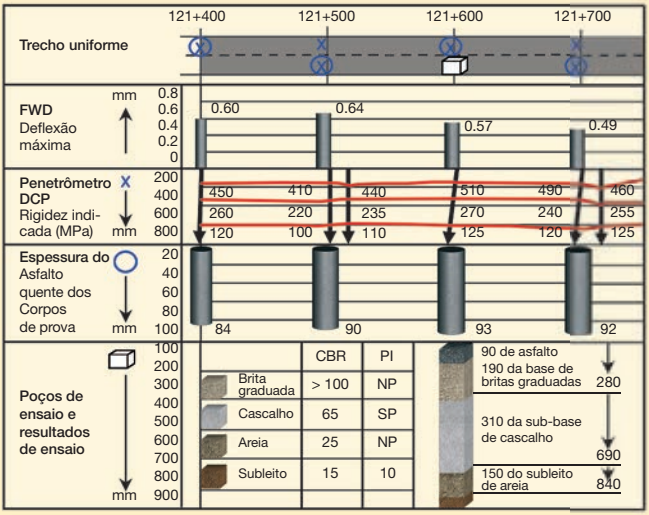
- A profundidade da trilha de roda é influenciada pelo comprimento da borda reta usada.

2.5.7 Síntese de todos os dados disponíveis

A fase detalhada de investigação culmina em sua síntese em uma planilha com todos os dados específicos de cada trecho uniforme, conforme vemos no exemplo abaixo.

As informações exibidas na tabela resumida são típicas de um levantamento abrangente. Uma vez que essa tabela resumida (ou mapa do trecho) contém as principais informações preliminares para um projeto de pavimento, todos os detalhes em relação às diferentes camadas do pavimento e às características de materiais devem ser incluídos.

Uma tabela resumida é elaborada para cada trecho uniforme. Com sua leitura conjunta e com o resumo da avaliação visual (Seção 2.4.2), o modo de deterioração (falha) e as áreas com problemas na estrutura existente do pavimento são facilmente identificados. Isso possibilita que o engenheiro de pavimentos se concentre em medidas alternativas de recuperação para tratar de fraquezas e áreas problemáticas identificadas, conforme descrição na próxima seção.



2.6 PASSO 4: Opções preliminares do projeto de recuperação do pavimento

Depois que os levantamentos forem concluídos e as tabelas resumidas descritas acima forem elaboradas, cada trecho uniforme pode ser considerado de forma isolada e as opções de projeto de recuperação podem ser formuladas. Assim como em todos os procedimentos de diagnóstico, o essencial para a definição da melhor solução é a identificação de todas as possibilidades já no começo. Entretanto, a razoabilidade deve prevalecer na identificação de alternativas, já que algumas destas podem ser obviamente inadequadas (normalmente devido a custos excessivos e/ou implicações de viabilidade da construção) e podem ser descartadas.

Depois de identificar todas as alternativas, um processo subjetivo de seleção é executado para identificar as três opções mais adequadas, assim reduzindo a quantidade de trabalho analítico necessário para o projeto dos diferentes pavimentos. Essas três soluções alternativas devem apresentar capacidades estruturais semelhantes e, se uma delas exigir camadas adicionais e/ou uma camada grossa de asfalto, as implicações do aumento do nível da estrada devem ser incluída nas análises.

O projeto do pavimento para uma recuperação é diferente do projeto de novos pavimentos, conforme será discutido nas seções seguintes.

2.6.1 Abordagem do projeto do pavimento

Nos últimos 60 anos, muitos métodos de projeto de pavimentos foram desenvolvidos, desde métodos relativamente simples e empíricos até abordagens de modelagem mais complexas que necessitam de programas de computador sofisticados.

Os vários métodos de projeto de pavimentos podem ser resumidos em dois títulos principais:

- **Métodos empíricos.** Esses métodos incluem:
  - o método de cobertura CBR, com base na resistência do subleito;
  - a abordagem de projetos de catálogo, com base em estruturas típicas de pavimentos para aplicações específicas;
  - o método de projeto de penetrômetro dinâmico de cone, que utiliza dados de levantamentos de penetrômetro dinâmico de cone para indicar a deficiência dos pavimentos existentes;
  - o método de número estrutural, que atribui coeficientes a vários tipos de material; e
  - o método do número de pavimento, que utiliza números estruturais “inteligentes”.
- **Métodos analíticos.** Esses métodos incluem um processo analítico seguido pela interpretação (elemento empírico) para traduzir os resultados das análises em capacidade estrutural (conhecida como função de transferência):
  - análises mecanicistas. Esses métodos se baseiam na análise da tensão e deformação com o uso de modelos lineares elásticos, elastoplásticos ou elementos finitos; e
  - métodos que utilizam medições de deflexão (análises de bacia de deflexão).

Como uma regra geral, os pavimentos com trânsito mais pesado (> 10 milhões de EASLs) devem ser sempre projetados com o uso de uma abordagem analítica. Um método empírico pode ser suficiente em pavimentos mais leves, mas se houver dúvida de que um projeto pode não ser adequado para as cargas de tráfego previstas deverá ser verificado através de um método analítico.

2.6.2 Métodos de projetos de catálogos

Métodos de projeto de catálogo são prescritivos em relação aos tipos e à qualidade dos materiais necessários para uma estrutura de pavimento adequada. O catálogo apresenta uma lista de tipos de pavimentos adequados para diferentes condições de suporte e capacidades estruturais. Embora essa abordagem de projeto seja geralmente desenvolvida através de procedimentos analíticos, ela é restritiva (já que não inclui todas as opções) e não facilmente transferível (já que é normalmente desenvolvida para materiais e condições climáticas locais). As condições de suporte usadas nos projetos de catálogo também precisam ser analisadas com base nas mesmas referências usadas no desenvolvimento das opções de projeto. Os projetos de catálogo são, portanto, de pouca utilidade na recuperação de pavimentos.

2.6.3 Método de número estrutural

Com base na experiência, os coeficientes estruturais foram desenvolvidos para certos materiais de pavimentos para seu uso no projeto estrutural. O método de projeto de pavimentos de 1993 da AASHTO utiliza um número estrutural definido pelo somatório do produto desses coeficientes estruturais e a espessura da camada. Se o total ultrapassar um número mínimo em relação à condição específica do subleito e do requisito de capacidade estrutural, a estrutura do pavimento será considerada adequada.

A abordagem de número estrutural (NE) é simples e utiliza materiais conhecidos com um histórico de desempenho em condições climáticas específicas. Deve-se tomar cuidado ao aplicar essa abordagem em condições climáticas extremas ou com materiais locais significativamente diferentes. Além disso, como não há um sistema de controle inerente para a manutenção do equilíbrio do pavimento em termos da rigidez relativa das camadas sobrepostas, esse método de projeto não é recomendado para pavimentos com um requisito de capacidade estrutural além de 10 milhões de ESALs.

Pavimento		Estrutural (por pol.)	Espessura da camada		Camada NE
Camadas	Material		mm	polegadas	
	Asfalto	0.4	100	4	1.6
	Brita CBR > 80	0.14	200	8	1.12
	Cascalho natural CBR > 45	0.12	300	12	1.44
	Subleito > 15			Σ SN =	**4.16**

Exemplo de cálculo de número estrutural

2.6.4 Método do número do pavimento

Este método é semelhante ao do método do número estrutural, mas utiliza valores de "rigidez de longo-prazo efetiva" (sigla ELTS, em inglês) em relação a diferentes materiais de pavimento em vez de coeficientes estruturais.
Esse método de projeto (descrito na TG2 (2009)) se baseia em análises do desempenho do pavimento de longo-prazo (LTPP) combinadas com pesquisas de laboratório e ensaios com um simulador de veículos pesados.

O número do pavimento é somado ao produto do valor ELTS e à espessura da camada. O número obtido é usado em uma curva de fronteira (resultante do exercício do LTPP) para indicar a capacidade estrutural da estrutura do pavimento.

Assim como os números estruturais, o número do pavimento (NP) é de simples utilização. A principal diferença entre os dois métodos é o procedimento que define os valores ELTS e não a seleção do coeficiente estrutural. Esse procedimento inclui um sistema abrangente de classificação de materiais em várias camadas e leva em consideração o clima, o local da camada na estrutura do pavimento e a quantidade de cobertura sobre o subleito. Ele utiliza a regra do índice modular para garantir o equilíbrio do pavimento.

As diferentes classes de materiais e seus índices modulares/valor máximo de rigidez permitida estão resumidos na tabela abaixo (ver também TG2 (2009)).

Tipo de material	Classe	Principal característica de resistência	Índice modular	Rigidez máxima (MPa)*
HMA	AC	Marshall	5	2500
Estabilizado com betume	Estabilizados com betume Classe 1	ITS_{SECA} > 225 kPa $ITS_{ÚMIDA}$ > 100 kPa	3	600
Estabilizado com cimento	Base tratada com cimento Classe C3	1.5 < UCS < 3 MPa	4	550
Brita	G1	CBR > 100	2.0	700
	G2		1.9	500
	G3		1.8	400
Cascalhos naturais	G4	CBR > 80	1.8	375
	G5	CBR > 45	1.8	320
	G6	CBR > 25	1.8	180
	G7	CBR > 15	1.7	140
Solos	G8	CBR > 10	1.6	100
	G9	CBR > 7	1.4	90
	G10	CBR > 3	1.2	70

* Esses valores máximos de rigidez são relevantes apenas no modelo de Número de Pavimento empírico. Eles não servem como dados de entrada para modelos mecanicistas (ver Seção 4.3.12).

Estrutura do pavimento			Espessura da camada	Índice modular	Rigidez máxima	ELTS	Camada NP
Camadas	Material	Classe	mm		MPa	MPa	
	Asfalto	AC	100	5	2,500	2,340	23.4
	BRITA CBR > 80	G1	200	2	700	468	9.36
	Cascalho natural CBR > 45	G5	300	1.8	320	234	7.02
	Subleito > 15	G7	Cobertura do subleito 600 mm		130	Σ SN =	39.78

Exemplo de cálculo de número de pavimento

Os números de pavimentos podem ser usados com confiabilidade para projetar pavimentos com capacidade estrutural até 30 milhões de ESALs, o limite da curva de fronteira.
Esse é um limite artificial já que ele é ditado pelo volume máximo de trânsito realizado nos pavimentos que foram incluídos no conjunto de dados do LTPP. Uma vez que esse conjunto de dados é ampliado e atualizado, a curva de fronteira será ampliada e incluirá capacidades estruturais além de 30 milhões de ESALs.

2.6.5 Métodos de projeto mecanicista

O processo de projeto mecanicista utiliza a mecânica estrutural e os modelos de materiais para analisar as tensões, deformações e deflexões que se desenvolvem na estrutura do pavimento com a aplicação de uma carga. O valor pertinente de tensão, deformação e deflexão é relacionado à capacidade estrutural (número de repetições de carga até a falha) por meio de uma "função de transferência", uma relação empírica resultante de pesquisa e/ou dados de desempenho do pavimento.

A teoria da elasticidade linear multicamada é geralmente usada nas análises do modelo do pavimento, principalmente porque ela é de relativamente simples utilização e configuração. (Outras ferramentas analíticas podem ser usadas para modelagem, incluindo análises de elementos finitos, incluindo modelos constitutivos de elasticidade não linear, elastoplasticidade e dependência de tensão). O pavimento é modelado com a definição da espessura da camada juntamente com as propriedades pertinentes do material em cada camada (em termos de módulo de elasticidade e módulo de Poisson). A condição de carga é definida (massa de eixo, configuração pneu/roda e pressão dos pneus) e a resposta de cada camada é calculada.

Os parâmetros de entrada dos materiais em cada camada são obtidos durante o estágio de investigação detalhada. A classificação de material com base em ensaios de laboratório fornece um indicativo dos valores de rigidez e módulo de Poisson para os materiais específicos. Além disso, análises de sondas de penetrômetro dinâmico de cone e bacias de deflexão são valiosas para as propriedades in situ dos materiais do pavimento.

O método de projeto mecanicista tem vantagens distintivas para o projeto de recuperação já que ele permite que materiais não padronizados das camadas existentes do pavimento sejam modelados com eficácia. Além disso, o método acomoda todas as opções de recuperação, principalmente camadas espessas e estabilizadas, que são características de pavimentos reciclados.

Carga aplicada:		80 kN por eixo sobre dois pneus, com pressão do pneu de 750 kPa			
Pavimento		Espessura da camada	Módulo de Poisson	Módulo de resiliência (dependente de umidade)	Critério de falha (parâmetro de avaliação)
Camadas	Material	mm		MPa	
	Asfalto	100	0.4	2,500 – 5,000	Deformação de tração
	BRITA CBR > 80	200	0.35	300 – 800	Índice de tensão de desvio
	Cascalho natural CBR > 45	300	0.35	150 – 400	Índice de tensão de desvio
	Subleito > 15	Infinito	0.35	70 – 140	Deformação vertical

Parâmetros de entrada de um modelo de elasticidade linear multicamada

2.6.6 Métodos com base em deflexão

Métodos de projeto de recuperação com base em deflexão são principalmente usados para a definição da espessura de camadas de asfalto sobrepostas. Medições de deflexão são analisadas para a definição da rigidez eficaz da estrutura do pavimento existente, sendo que isso é usado como dado de entrada primário no exercício mecanicista para indicar a espessura do asfalto necessária para acomodar a condição de aplicação de carga, considerando-se os efeitos de rachaduras reflexivas das camadas ligadas existentes. Uma abordagem iterativa é adotada para determinar a espessura da camada de asfalto sobreposta que previna que níveis de tensão no material novo ultrapassem o limite de elasticidade, assim alcançando a capacidade estrutural exigida.

De forma alternativa, as deflexões podem ser usadas para uma indicação da deformação na parte superior do pavimento, o que indicará a espessura da camada de asfalto sobreposta necessária.

2.6.7 Resumo de abordagens do projeto do pavimento

Fases de investigação e projeto devem ser integradas com o objetivo principal de entender o comportamento do pavimento existente. O segundo objetivo é determinar o projeto de pavimento com a melhor relação de custo e benefício que satisfaça às expectativas em relação à vida útil e às propriedades funcionais, minimizando intervenções de manutenção e produzindo um pavimento que possa ser recuperado ao final de sua vida útil a um custo mínimo.

Métodos de projeto mecanicista são favorecidos como um meio de verificar a adequação do pavimento existente, identificando fraquezas, e para projetar pavimentos que atendam aos requisitos de recuperação. Métodos de projeto empíricos podem ser usados em níveis mais baixos de trânsito do projeto ou como a primeira tentativa de projeto de recuperação.

2.7 PASSO 5: Projeto de mistura de laboratório

Projetos de misturas de laboratório desempenham o papel de verificar a adequação dos materiais selecionados para o tratamento com aditivos. Esses aditivos podem incluir agentes estabilizadores, produtos químicos, agregados e materiais naturais. Projetos de mistura são uma parte fundamental da investigação de pavimentos e do procedimento de projeto, servindo ao objetivo de estabelecer o método mais eficaz de tratamento dos materiais para a melhoria das propriedades de engenharia. (O Capítulo 4, “Agentes estabilizadores”, inclui informações detalhadas sobre agentes estabilizadores.)

Amostras do material a ser tratado são submetidas a ensaios de projeto de mistura. Essas amostras devem ser preparadas para simular o mais próximo possível o material que será produzido no local durante o processo de tratamento. No caso de materiais ligados de um pavimento existente (ex.: asfalto) serem reciclados in situ, amostras devem ser coletadas com o uso de uma fresadora de pequeno porte para simular a classificação do material que será produzido pela recicladora.

Procedimentos de projeto de mistura que podem ser usados com a estabilização com cimento, emulsão betuminosa e espuma de asfalto são descritos no Capítulo 4 e incluídos no Apêndice 1. Esses procedimentos compreendem essencialmente cinco passos:

Passo 1: Seleção inicial de agentes estabilizadores, levando em consideração:

- adequação de um agente estabilizador em relação ao tipo e qualidade do material a ser tratado. A seleção inicial do agende estabilizador mais adequado se baseia nos resultados de ensaios de laboratório realizados com material não tratado;
- propriedades de engenharia exigidas em relação ao material estabilizado;
- disponibilidade em termos da capacidade de produzir os requisitos diários de volume, assim como a consistência da qualidade do agente estabilizador que pode ser fornecido; e
- o custo relativo dos diferentes agentes estabilizadores.

Com base nas informações descritas acima, uma decisão é tomada em relação ao projeto de mistura com o uso do agente estabilizador mais adequado. De forma alternativa, muitas opções de projeto de mistura podem ser levantadas simultaneamente para a definição de qual é a mais adequada.

Passo 2: Um exercício de otimização é realizado com o preparo de muitas porções idênticas da amostra e sua mistura com diferentes quantidades de agente estabilizador. Simultaneamente, água é adicionada para que a mistura alcance seu teor de umidade ótimo (para compactação). Tipicamente, no mínimo quatro misturas são preparadas, sendo cada uma misturada com um teor de estabilizador.

Passo 3: Amostras são produzidas com o uso de um trabalho de compactação padrão.

Passo 4: As amostras são curadas, sendo o ideal a simulação de condições de campo.

Passo 5: Depois da cura, as amostras são submetidas a vários ensaios para avaliar suas propriedades de engenharia, assim como sua suscetibilidade à umidade.

Para definir o teor ótimo de estabilizador, os resultados desses ensaios são comparados graficamente ao teor de estabilizador de cada uma das misturas. O teor de estabilizador que atende melhor às propriedades desejadas é considerado o teor ótimo do estabilizador (também conhecido como o índice de aplicação ideal de agente estabilizador).

Observação:

- Os resultados do projeto de mistura devem ser integrados aos projetos de pavimento.

2.8 PASSO 6: Finalização das opções do projeto do pavimento

As opções iniciais do projeto de pavimento descritas acima na Seção 2.6 foram desenvolvidas, necessariamente, com base nos valores pressupostos das propriedades de engenharia do material das novas camadas estabilizadas. As propriedades reais são definidas pela realização de projetos de mistura descritos acima na Seção 2.7. Se as propriedades reais forem significativamente diferentes das pressupostas, o projeto do pavimento e a utilização do material deverão ser revistos. Se os valores pressupostos não forem alcançados nos projetos de mistura, as seguintes opções poderão ser consideradas:

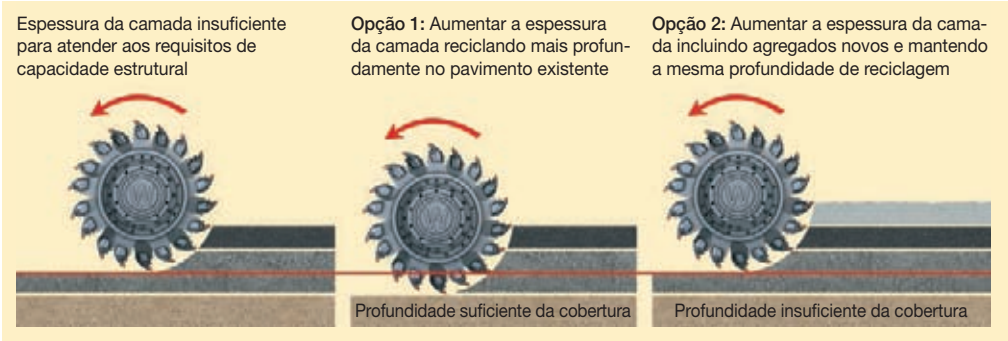
- Aumento da espessura da camada. Em obras de reciclagem, esse aumento resultará em um corte mais profundo que possa incorporar os diferentes materiais (normalmente de qualidade inferior) do pavimento subjacente. Se a mudança do material for significativa, o projeto de mistura deverá ser repetido para definir as propriedades corretas.

  De forma alternativa, o material reciclado poderá ser misturado com novos agregados para aumentar efetivamente a espessura da camada. No caso em que for óbvio que a reciclagem mais profunda não tratará da deficiência das propriedades do material, a mistura com agregados de boa qualidade (ex.: pedras britadas) pode ser considerada. Entretanto, essa mudança invariavelmente pressupõe a repetição do projeto de mistura.

- Utilize um agente estabilizador diferente ou uma combinação diferente de agentes estabilizadores. Essa opção requer um novo projeto de mistura.

- Importe e estabilize uma camada adicional sobre a estrutura do pavimento existente. Isso criará um pavimento mais profundo, assim reduzindo os níveis de tensão e deformação na parte existente do pavimento.

O projeto do pavimento é, assim, finalizado com a alimentação dos valores do projeto de mistura em relação aos materiais estabilizados no modelo do projeto do pavimento e refinando-se a espessura da camada de material estabilizado para atender aos requisitos de capacidade estrutural.


Espessura da camada insuficiente para atender aos requisitos de capacidade estrutural
Opção 1: Aumentar a espessura da camada reciclando mais profundamente no pavimento existente
Opção 2: Aumentar a espessura da camada incluindo agregados novos e mantendo a mesma profundidade de reciclagem
Profundidade suficiente da cobertura
Profundidade insuficiente da cobertura

2.9 PASSO 7: Análises econômicas

A análise econômica é considerada uma ferramenta eficaz para a seleção da opção de recuperação mais adequada. Projetos alternativos de recuperação de pavimentos não podem ser comparados somente com base em custos de construção. Além dos custos de manutenção necessária ao longo da vida útil da estrada (que depende do tipo de pavimento, estrutura, materiais, etc.), o valor de recuperação terminal (custo para recuperar a via ao final de sua vida útil) também deve ser incluído na análise econômica. Portanto, todos os custos ligados à vida útil do pavimento (os custos globais) devem ser integrados nos respectivos cálculos.

O método de análise econômica normalmente usado para a comparação de opções alternativas de pavimentos é o método Valor Presente de Custo (sigla PWoC em inglês). Esse método se baseia em estimativas de todos os custos que serão decorrentes durante a vida do pavimento (os custos integrais que incluem os custos iniciais de construção, mais o custo de toda a manutenção de rotina, mais a recuperação ao final da vida útil), realizando-se o desconto para contabilizar o valor temporal do dinheiro. Nesse exercício, é de suma importância a adoção da taxa de desconto correta para que o valor presente da manutenção futura e os custos de recuperação sejam realistas.

É geralmente difícil estimar custos de construção e custos de manutenção futura de forma comparativa. O conhecimento local dos materiais e do ambiente assim como dados sobre as funções do desempenho do pavimento (normalmente obtidos a partir do Sistema de Gerenciamento do Pavimento) serão úteis na definição de medidas realistas de manutenção futura bem como sobre o seu momento certo. O processo de avaliação é explicado por meio de um exemplo na Seção 5.2.

O Apêndice 4 contém uma contextualização ampla de avaliações econômicas e inclui algumas das técnicas aplicáveis às análises econômicas de diferentes estruturas de pavimentos (ex.: Valor Presente de Custo (PWoC), relações de custo e benefício, taxa interna de retorno e valor presente líquido).

3 Reciclagem a frio

3.1	Geral	75
3.2	O processo de reciclagem a frio	77
3.2.1	Reciclagem em usina	78
3.2.2	Reciclagem in situ	79
3.3	Máquinas para reciclagem in situ	84
3.4	Aplicações de reciclagem a frio	90
3.4.1	Reciclagem 100% RAP	93
3.4.2	Combinação de material RAP/granular	94
3.5	Vantagens da reciclagem a frio	97
3.6	Aplicabilidade do processo de reciclagem a frio	98

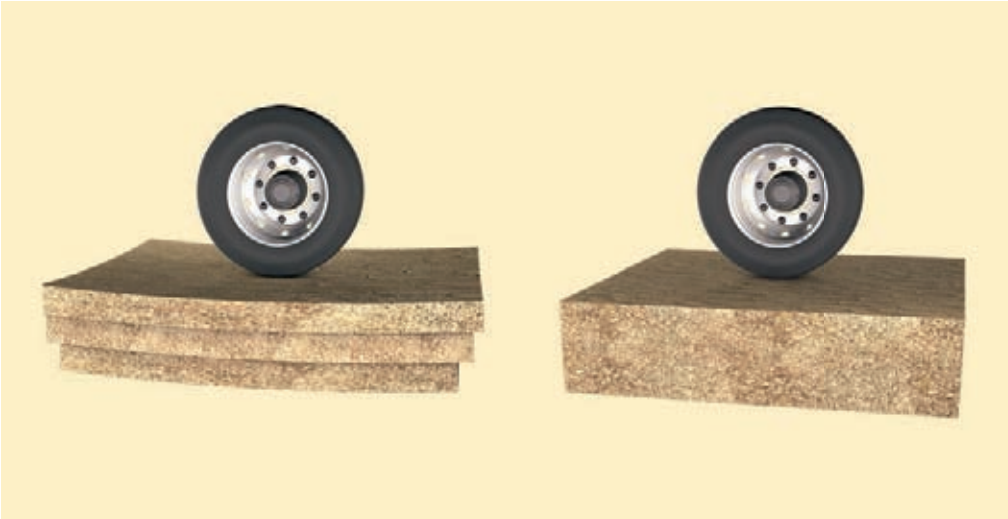
3.1 Geral

A reciclagem a frio é o termo usado para a recuperação e reutilização de materiais de um pavimento existente, sem a adição de calor. Diferentemente da reciclagem a quente, que se limita ao aquecimento e à reutilização de material asfáltico, o campo da reciclagem a frio goza de uma ampla gama de aplicações, desde camadas relativamente finas que compreendem principalmente material asfáltico (também conhecido como “reciclagem a frio in situ”) até camadas espessas que incluem dois ou mais materiais diferentes do pavimento (também conhecido como “reciclagem em profundidade total”).

Este capítulo descreve as várias aplicações da reciclagem a frio e introduz os equipamentos necessários para a realização do trabalho, especificamente a linha de máquinas da Wirtgen. Também são abordadas as vantagens resultantes da adoção da reciclagem a frio e, além disso, os principais fatores que influenciam a adequação do uso de tal processo em uma obra específica.

Recicladoras in situ, como a WR 2500 S, podem trabalhar em profundidades além de 300 mm, quebrar e utilizar 100% de material in situ, manter um horizonte configurado no pavimento existente e produzir uma qualidade de material de mistura comparável com a mistura que não seja in situ. O conflito com o trânsito público se limita aos veículos de fornecimento que têm acesso ao canteiro da obra. As áreas fracas no pavimento subjacente não são prejudicadas e a exposição a condições climáticas rigorosas é significativamente reduzida com o processamento do material em uma única passada e com a compactação do produto tratado imediatamente atrás da recicladora. Além disso, taxas de produtividade de 10.000 m² por turno são possíveis e o risco de falhas devido à má qualidade do trabalho é drasticamente reduzido.

Com essas capacidades, as recicladoras apresentaram aos engenheiros de pavimentos toda uma nova série de possibilidades, sendo a mais importante a habilidade de construir camadas monolíticas espessas de material estabilizado. A partir de uma perspectiva estrutural, uma camada de 300 mm de espessura de material estabilizado tem uma capacidade de suporte de carga muito superior que duas camadas de 150 mm de espessura uma sobre a outra. Esse conceito é bem conhecido no setor de construção, em que vigas de madeira laminada são usadas como membros estruturais.



Uma camada espessa de material ligado é semelhante a uma viga de madeira laminada

3.2 O processo de reciclagem a frio

A reciclagem a frio pode ser realizada “em usina”, transportando-se o material recuperado de uma estrada até um depósito central onde ele é dosado através de uma unidade misturadora, ou in situ, com o uso de uma recicladora. O processamento em usina é geralmente a opção mais cara em termos de custo por metro cúbico de material processado, principalmente devido a custos de transporte ausentes na reciclagem in situ. Entretanto, o processamento em usina se torna atrativo quando:

- camadas adicionais de pavimento são necessárias. O processamento em usina é normalmente preferido quando materiais previamente armazenados em pilhas de estoque, recuperados de pavimentos existentes, podem ser reciclados e utilizados para a construção de uma nova camada de pavimento. Materiais tratados com agentes estabilizadores betuminosos podem ser depositados em uma pilha de estocagem para utilização posterior. Isso está sendo cada vez mais usado para tratar de pilhas de estocagem de materiais de pavimentos de asfalto reciclado (RAP);
- diferentes materiais são combinados em proporções precisas; e/ou
- o material do pavimento existente é altamente variável e requer um processo de seleção; e/ou
- o material do pavimento existente é tão duro que não poder ser adequadamente pulverizado in situ. Esses materiais são retirados da estrada e tratados antes de serem usados como material de pavimento (ex.: britando-se pedaços de asfalto ou concreto envelhecido).

Sempre que sua adoção for possível, a reciclagem in situ será o método de reciclagem preferencial devido exclusivamente às vantagens econômicas oferecidas. Considerando-se a deterioração de pavimentos no mundo todo, a recuperação de pavimentos existentes ultrapassa a demanda por novas estradas, sendo que a reciclagem in situ foi aceita universalmente como o método preferencial para tratar desse enorme acúmulo de obras de recuperação de pavimentos. Por isso, a reciclagem in situ justifica o foco deste manual, sendo que o tratamento em usina recebe menor atenção, embora sempre constitua uma opção. Cada processo será discutido separadamente nas seções seguintes.

Observação:

- A reciclagem a frio de pavimentos existentes é o método universalmente preferencial para a recuperação estrutural.

3.2.1 Reciclagem em usina

A reciclagem em usina possibilita que os materiais de um pavimento existente sejam selecionados e tratados de antemão, assim aumentando o nível de confiança que pode ser alcançado no produto final. As principais vantagens resultantes do método em usina comparado ao tratamento in situ são:

- Controle dos insumos. Enquanto a reciclagem in situ não possibilita o controle em relação ao tipo de material recuperado de um pavimento existente, o produto final exigido pode ser obtido pela combinação de diferentes agregados em proporções precisas com a sua mistura na usina. Os materiais de insumo podem ser selecionados, tratados de antemão (ex.: britagem e peneiramento), armazenados em pilhas de estocagem e testados antes da mistura. A proporção de vários materiais de insumo pode ser alterada conforme e quando necessário para a obtenção da mistura exigida.
- Qualidade da mistura. Ajustes podem ser realizados no misturador para variar o tempo pelo qual o material é retido na câmara de mistura, assim melhorando a qualidade da mistura.

Operação típica em usina com pilhas de estocagem de material de insumo

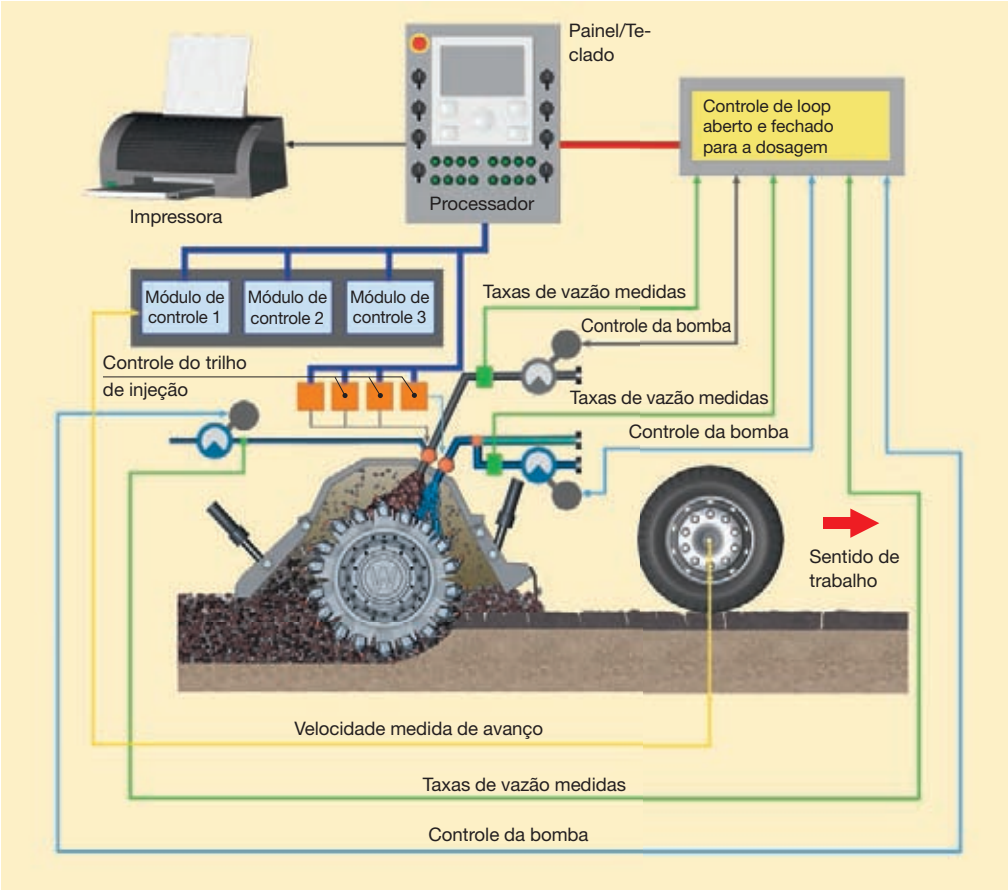
- Capacidade de pilhas de estocagem. Particularmente com materiais estabilizados com betume, o produto misturado pode ser depositado em uma pilha de estocagem e utilizado mediante a necessidade, assim eliminando a interdependência dos processos de mistura e pavimentação. Entretanto, deve-se levar em consideração quaisquer limitações aplicáveis ao tempo de estocagem de misturas que incluem cimento.

A pavimentação do material misturado na estrada como uma nova camada pode ser realizada por uma pavimentadora ou motoniveladora, conforme a necessidade, ou manualmente com métodos de uso intensivo de mão de obra.

3.2.2 Reciclagem in situ

As recicladoras evoluíram com o passar dos anos, de fresadoras modificadas e estabilizadoras de solo básicas até chegarem às recicladoras especialistas de hoje. Uma vez que elas são projetadas especificamente para reciclar camadas espessas de pavimento em uma única passada, as recicladoras modernas tendem a ser máquinas potentes e de grande porte, montadas sobre esteiras ou sobre pneus de alta flutuação. Nos últimos 20 anos, a Wirtgen investiu pesadamente no desenvolvimento dessa tecnologia, e a sua linha atual de máquinas de alto desempenho é prova dos avanços que foram alcançados. Uma breve visão geral dos diferentes tipos de recicladoras produzidas pela Wirtgen e suas aplicações típicas serão apresentadas na Seção 3.3.

O coração de todas as recicladoras é o cilindro de corte, equipado com um grande número de ferramentas de corte. Diferentes ferramentas são disponíveis para atender a diferentes condições de corte (ex.: rigidez, abrasão, etc.). O cilindro normalmente gira para cima e, à medida que a máquina avança, o material do pavimento in situ é pulverizado pelas ferramentas e suspenso até a câmara de mistura que envolve cilindro (o compartimento do cilindro). As recicladoras são equipadas com, no mínimo, um sistema de bombeamento para a adição de fluido (ex.: água) ao material recuperado. A taxa de aplicação do fluido é dosada de forma precisa por meio de um microprocessador que regula a vazão de acordo com o volume do material na câmara de mistura. O fluido é injetado na câmara de mistura através de uma série de bicos espaçados de forma equidistante sobre uma barra de aspersão que se estende por toda a largura da câmara, conforme ilustrado no diagrama da página ao lado.



Controle por microprocessador em relação aos sistemas de injeção da Wirtgen WR 2500 S

A reciclagem é realizada pelo acoplamento de caminhões-tanque à recicladora. A recicladora empurra ou puxa os caminhões-tanque que fornecem os aditivos necessários à mistura (ex.: emulsão betuminosa).

A combinação de caminhões-tanque acoplados à recicladora é configurada de acordo com a aplicação de reciclagem específica e com o tipo do agente estabilizador aplicado.

Sequência da máquina em uso

A combinação mais simples consiste em uma recicladora acoplada a um único caminhão-pipa. À medida que a máquina avançar, o material do pavimento in situ será recuperado e misturado com a água puxada do caminhão. O microprocessador garante que a quantidade certa de água seja injetada na câmara de mistura através da barra de aspersão montada sobre a face dianteira do compartimento do cilindro (ilustrado no desenho da página ao lado).
O cilindro giratório mistura a água com o material recuperado até alcançar uma consistência uniforme. A taxa de adição de água é controlada para alcançar um teor de umidade que possibilite um alto nível de densidade quando o material for compactado.

À medida que a recicladora avançar, o material misturado cairá no espaço vazio criado pelo cilindro de corte e será impactado pela porta resistente localizada na traseira do compartimento do cilindro. Conforme o desenho, um rolo compactador segue atrás da recicladora para compactar o material antes que uma motoniveladora seja usada para ajustar o nivelamento final. O que o desenho não mostra é o processo de compactação final e acabamento, que utiliza rolos compactadores vibratórios e de pneu junto com um caminhão-pipa.

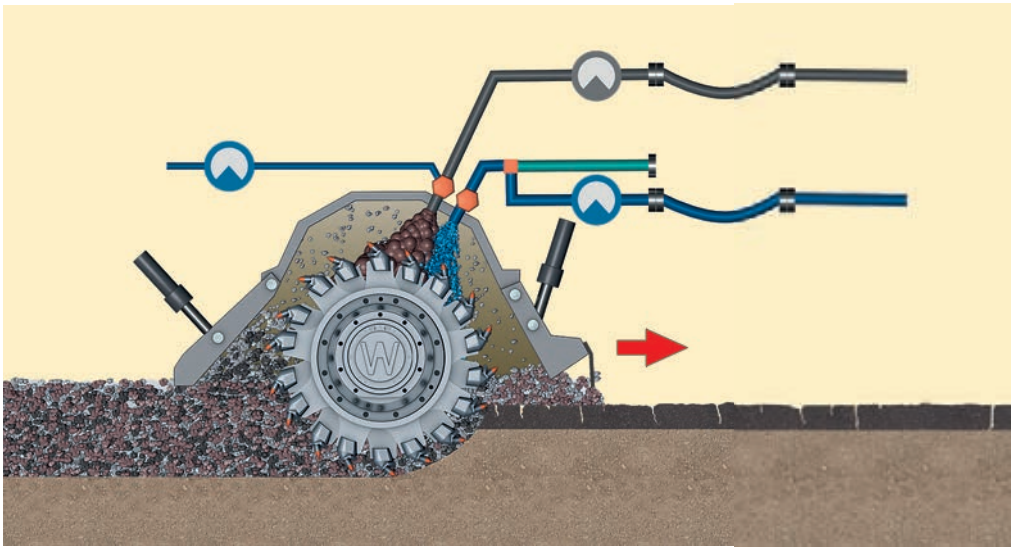
Agentes estabilizadores em pó (ex.: cimento ou cal hidratada) são normalmente espargidos na superfície da via existente à frente da operação de reciclagem. Quando a recicladora avança, o pó é suspenso e misturado com o material recuperado e com a água, tudo em uma única operação.

Observação:

- O microprocessador é de suma importância, já que ele controla a taxa de aplicação de água e betume.

De forma alternativa, o pó pode ser misturado com a água para formar uma suspensão de lama que é injetada na câmara de mistura. Com a adoção desse método de aplicação, uma unidade especial de mistura deverá ser acoplada à recicladora. Essa “unidade de mistura de lama” produz a lama combinando quantidades precisas de cimento e água para tratar do volume de material sendo reciclado. A lama é então bombeada pela recicladora por meio de uma mangueira flexível e injetada através da barra de aspersão.

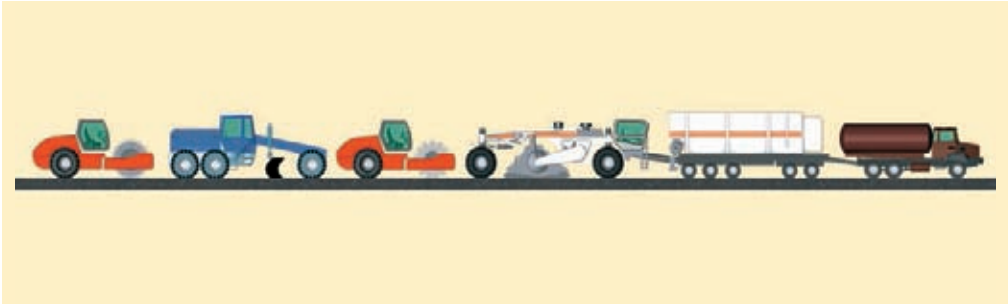
No caso da adição de um agente estabilizador betuminoso (emulsão betuminosa ou espuma de asfalto), um segundo sistema de aplicação deverá ser montado na recicladora, com uma barra de aspersão separada ligada na parte superior do compartimento do cilindro, conforme ilustrado no desenho abaixo.



Aplicação dupla de água e espuma de asfalto

Essa aplicação requer que um caminhão-tanque com betume seja acoplado à recicladora. Além disso, um filler ativo (cimento ou cal hidratada) é normalmente adicionado ao agente estabilizador betuminoso (conforme explicação no Capítulo 4). No caso de um filler ativo ser espargido em pó na camada de rolamento à frente do processo de reciclagem, o caminhão-tanque de betume será acoplado diretamente à recicladora e o caminhão-pipa será empurrado na dianteira como primeiro veículo do trem. Entretanto, caso o filler ativo seja adicionado como lama, a unidade misturadora de lama será sempre colocada imediatamente à frente da recicladora e o caminhão-tanque de betume se tornará o primeiro veículo, conforme ilustrado no desenho abaixo.

O processo de reciclagem in situ descrito e ilustrado acima trata de recicladoras montadas sobre rodas. Embora o processo seja semelhante no caso de máquinas de esteiras, existem algumas diferenças essenciais, que serão descritas na seção seguinte.



Recicladora acoplada a uma misturadora de lama e a um caminhão-tanque de betume

3.3 Máquinas para reciclagem in situ

Esta seção inclui uma visão geral sobre três tipos de máquinas de reciclagem in situ produzidas pela Wirtgen, bem como suas respectivas capacidades. Máquinas específicas não são descritas, nem suas especificações são incluídas. Essas informações podem ser encontradas na publicação "Aplicação de reciclagem a frio da Wirtgen", que trata da aplicação de recicladoras e dos vários processos de construção.

Os três tipos de máquinas de reciclagem in situ são:

- **Recicladoras de rodas.**
  Essas máquinas são projetadas principalmente para a reciclagem. A Wirtgen tem diversos modelos, com diferentes massas e capacidades em sua linha de produtos; a foto mostra uma máquina de porte médio.

Como podemos ver na ilustração da página ao lado, as ferramentas de corte são posicionadas em um padrão em "V" e montadas sobre suportes para promover a mistura.

Essa configuração de ferramentas promove a mistura no plano vertical mas não no horizontal. Isso significa que o material recuperado não é deslocado lateralmente nem longitudinalmente a partir do seu local de origem no pavimento (o movimento máximo medido em ensaio é de 200 mm). Isso significa que o material do horizonte reciclado será devolvido ao pavimento, depois da reciclagem, aproximadamente no mesmo local, refletindo quaisquer diferenças locais.

A recicladora de rodas Wirtgen WR 2400

O cilindro de corte em uma recicladora de rodas

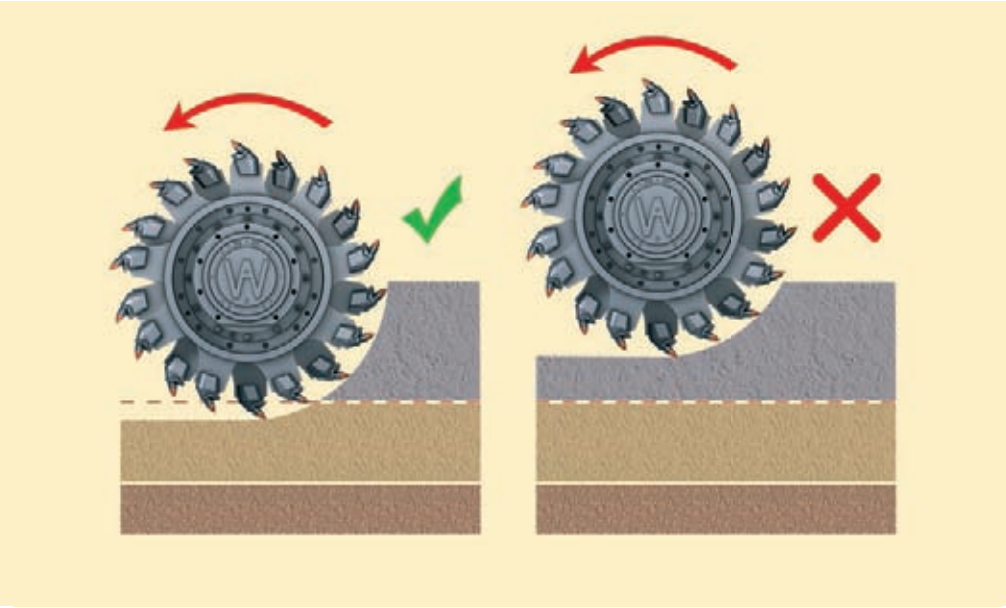
As rodas traseiras das recicladoras de pneus rodam sobre o material tratado

Camadas de material denso e não ligado podem ser facilmente quebradas, retornando ao seu estado original descompactado. O nível de pulverização das camadas de material ligado (ex.: asfalto) é influenciado principalmente pela velocidade de deslocamento da recicladora, mas também pela velocidade de rotação do cilindro. Quanto maior a velocidade de deslocamento e mais baixa a velocidade de rotação, mais grosso o produto. Grandes pedaços de material que não foram pulverizados no processo tendem a ser jogados para a parte inferior da camada.

As rodas traseiras das recicladoras de pneus são localizadas dentro do limite das extremidades do cilindro de corte, para rodarem nas bordas externas do material reciclado. Como podemos ver na figura, o material nas trilhas das rodas é compactado enquanto o material entre as trilhas das rodas permanece em estado solto (“fofo”).

As recicladoras de rodas também são usadas amplamente para pulverizar camadas espessas de material ligado em pavimentos existentes (máquinas de porte maior são usadas para camadas mais espessas). Cada vez mais, essas máquinas estão sendo usadas para o tratamento prévio de camadas espessas (até 500 mm de espessura) na porção inferior do pavimento. Esse tratamento prévio inclui a quebra granular de materiais ou rochas brandas e a adição de água para alcançar um teor de umidade consistente que facilite a compactação.

O cilindro de corte de recicladoras de rodas deve primeiro penetrar pelo lado de baixo do material ligado (ex.: asfalto) antes que a máquina possa avançar e pulverizar o asfalto, conforme mostram as figuras.



As recicladoras de rodas devem atacar o material ligado (asfalto) a partir de baixo da camada

Recicladoras de esteiras

O cilindro de corte dessas recicladoras é o mesmo usado para fresar asfalto, com as ferramentas de corte montadas em um padrão de hélice para deslocar o material para o centro do cilindro.

Em vez de ser suspenso e transportado por uma correia (como ocorre na fresagem), o material recuperado sai através da porta na parte traseira da câmara de fresagem e passa entre as esteiras traseiras para ser distribuído por toda a largura do corte por uma mesa variável equipada com helicoidais dosadores à esquerda e à direita. Os requisitos de nivelamento e formato finais podem ser geralmente alcançados com o uso dessa mesa, assim eliminando a necessidade de uma motoniveladora para fazer o corte do nivelamento final.

Assim como em recicladoras montadas sobre rodas, os sistemas de bombeamento controlados por microprocessador são integrados às barras de aspersão ligadas à parte externa do compartimento do cilindro para injetar aditivos de fluido no material que está na câmara de fresagem.

Diferentemente do que ocorre com as recicladoras de rodas, a ação de deslocamento do padrão de ferramentas de corte promove a mistura do material recuperado por cada metade do cilindro.

A recicladora de esteiras Wirtgen 2200 CR

O cilindro fresador de série da Wirtgen 2200 CR

As fresadoras são projetadas e produzidas para fornecer estabilidade durante o corte de camadas de asfalto duro. Tanto o compartimento do cilindro como o cilindro fresador são ligados ao chassi da máquina, e a profundidade do corte é variada com a suspensão e o rebaixamento de toda a máquina. Isso significa que:

- o cilindro não tem que penetrar no lado de baixo de camadas espessas e ligadas para conseguir reciclar o material. É possível reciclar somente a porção superior de camadas espessas e ligadas com o uso dessas máquinas; e
- o volume da câmara de fresagem é constante, independentemente da profundidade do corte. A quantidade de material que pode ser misturada é, assim, limitada, o que restringe a profundidade do corte que pode ser reciclado a um máximo de 250 mm (ou menos com a aplicação de um agente estabilizador coesivo).

Essas máquinas são ideais para a reciclagem de material 100% asfáltico. Um dos carros-chefes da linha de produtos de Recicladoras a frio da Wirtgen é a 2200 CR, equipada com um de cilindro com largura de 3,8 m, que possibilita a reciclagem da largura total de uma faixa de trânsito em uma única passada. Além disso, a rotação do cilindro é alterada do corte para cima (anti-horário) para o corte para baixo (sentido horário) para promover maior fragmentação na reciclagem exclusiva de camadas finas de asfalto.

Mesa de pavimentação instalada na traseira da Wirtgen 2200 CR

- **Máquinas equipadas com um misturador pug-mill de duplo eixo de bordo.**
  A Wirtgen produz um modelo de recicladora nessa categoria: a WR 4200 da foto na página ao lado.

  Essa máquina de esteiras é capaz de reciclar em uma profundidade máxima de 200 mm, incluindo:

  - uma largura de trabalho ajustável entre 2,8 m e 4,2 m. Isso possibilita a reciclagem de toda a largura de uma faixa de trânsito em uma única passada. Isso também permite que as juntas longitudinais (entre cortes adjacentes) fiquem fora das trilhas de roda do trânsito;
  - a largura da reciclagem pode ser variada durante a operação, facilitando a reciclagem de trechos de estreitamento de pista geralmente associados a mudanças de rodovia e praças de pedágio;
  - o material no horizonte de reciclagem é fresado e levantado até o misturador pug-mill de duplo eixo montado na máquina. Os dois sistemas de bombeamento proporcionam a adição precisa de agentes estabilizadores e água, sendo que a qualidade de mistura alcançada é semelhante àquela de usinas misturadoras estacionárias; e
  - a suspensão do material recuperado da estrada e a sua mistura na recicladora produzem uma uniformidade da mistura por toda a largura do corte. Em outras palavras, o material recuperado em toda a largura do corte é misturado de forma integral.

A Wirtgen WR 4200 com um misturador pug-mill de duplo eixo

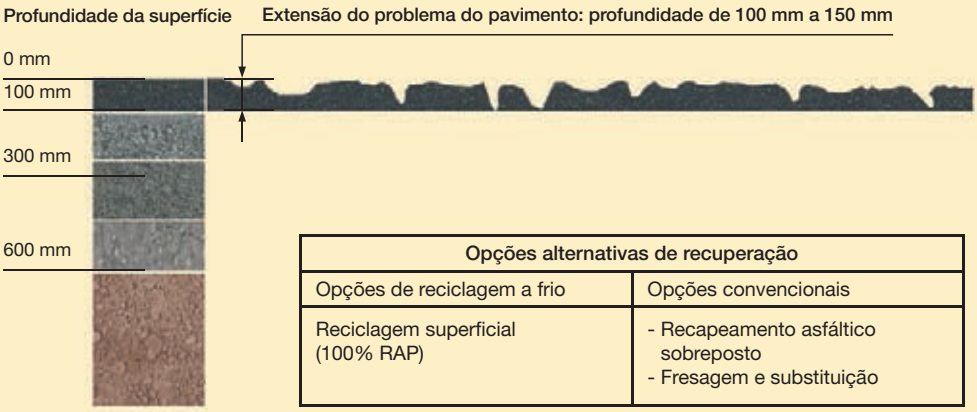
O material tratado é descarregado do misturador pug-mill na estrada como um monte ao longo da lateral e espargido pelo helicoidal. Uma mesa pavimentadora de largura variável é ligada à traseira da máquina para a pavimentação do material reciclado de acordo com o perfil exigido. Essa mesa é equipada com tampers e vibração pré-compactação.

3.4 Aplicações de reciclagem a frio

O processo de reciclagem a frio tem inúmeras aplicações possíveis para a manutenção e recuperação de pavimentos rodoviários. Entretanto, cada aplicação será específica para cada obra, com três fatores primordiais que ditarão o método de reciclagem mais adequado:

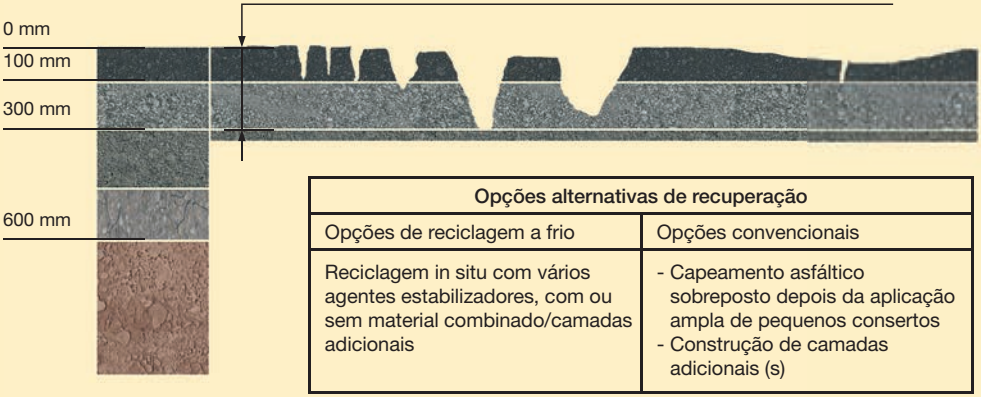
- O tipo de deterioração do pavimento que precisa ser tratado;
- A qualidade do material no horizonte de reciclagem; e
- O resultado requisitado (ou seja, a expectativa de vida útil).

Os desenhos a seguir mostram três condições de deterioração de pavimento com algumas das diferentes opções que podem ser aplicadas para o tratamento de suas respectivas deteriorações.



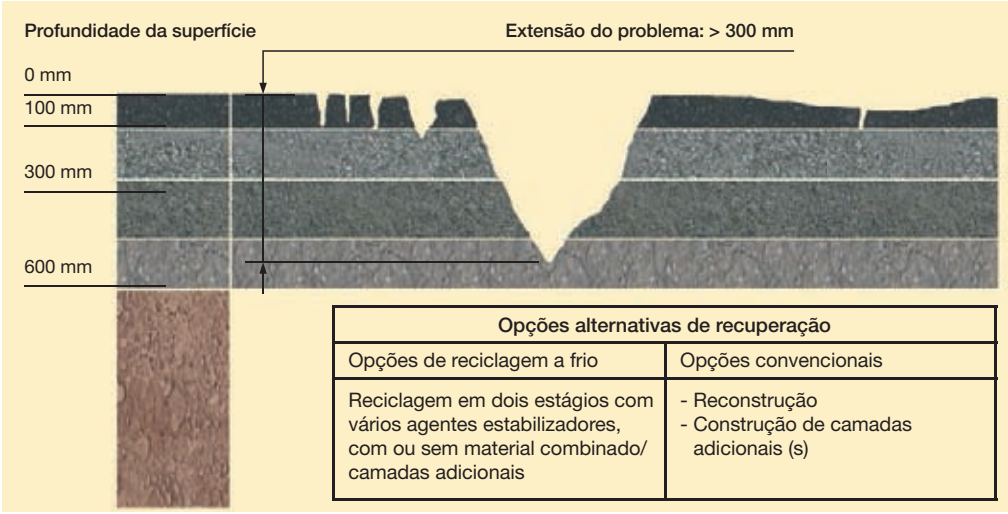
Opções alternativas de recuperação	
Opções de reciclagem a frio	Opções convencionais
Reciclagem superficial (100% RAP)	- Recapeamento asfáltico sobreposto - Fresagem e substituição

Opções de recuperação para deterioração do pavimento superior/camada superficial



Opções alternativas de recuperação	
Opções de reciclagem a frio	Opções convencionais
Reciclagem in situ com vários agentes estabilizadores, com ou sem material combinado/camadas adicionais	- Capeamento asfáltico sobreposto depois da aplicação ampla de pequenos consertos - Construção de camadas adicionais (s)

Opções de recuperação para a deterioração estrutural das camadas superiores do pavimento



Opções alternativas de recuperação	
Opções de reciclagem a frio	Opções convencionais
Reciclagem em dois estágios com vários agentes estabilizadores, com ou sem material combinado/ camadas adicionais	- Reconstrução - Construção de camadas adicionais (s)

Opções de recuperação para tratar a deterioração estrutural profunda

Os materiais encontrados no horizonte de reciclagem podem ser classificados em dois tipos de materiais principais:

- material 100% de pavimento asfáltico reciclado (RAP), em que a profundidade da reciclagem encontra somente asfalto; e
- Mistura de RAP/material granular, em que a profundidade de reciclagem inclui camadas de diferentes materiais usados para construir a porção superior do pavimento. Eles incluem RAP, materiais betuminosos da camada superficial, pedras britadas e cascalhos naturais, assim como materiais que foram previamente estabilizados (principalmente pedras britadas e cascalho natural).

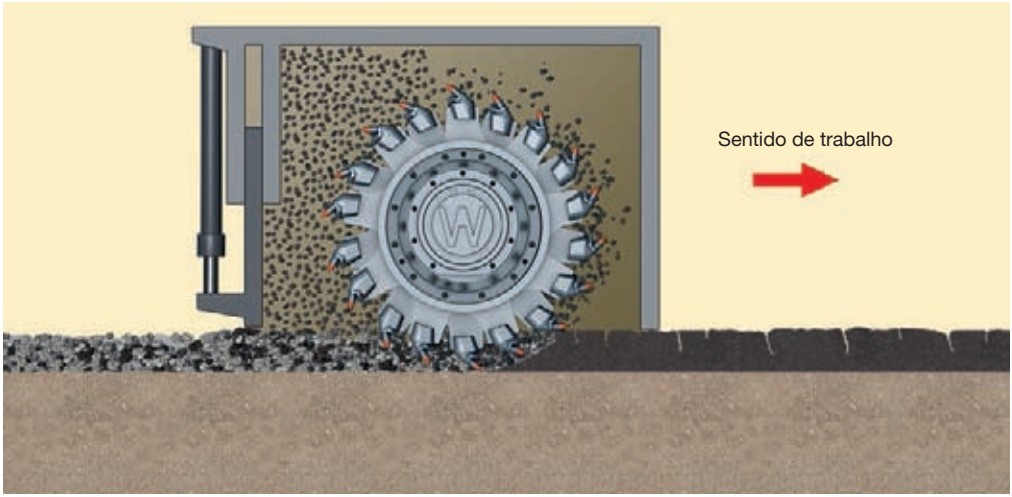
Essas duas classes de material são discutidas nas seções seguintes juntamente com os diferentes tipos de tratamentos que podem ser considerados para a melhoria das propriedades de engenharia do material reciclado, quando necessário, para atender às expectativas de vida útil do pavimento recuperado.

3.4.1 Reciclagem 100% RAP

A reciclagem de material exclusivamente RAP requer a consideração dos seguintes fatores:

- natureza e composição do asfalto existente (ou seja, o tipo de mistura, a classificação do agregado, o teor de ligante, o envelhecimento do betume, etc.);
- tipo e causa da deterioração (ou seja, deformação permanente (trilha de roda/deformação com deslocamento lateral) ou rachadura (modo térmico ou de fadiga));
- extensão da deterioração (ou seja, isolada ou abrangente); e
- objetivo da reciclagem (ou seja, ação paliativa ou de recuperação da integridade estrutural).

Dependendo dos requisitos estruturais, o material RAP reciclado pode ser tratado com um aditivo ou devolvido ao pavimento como material granular (ver Capítulo 6).



Reciclagem de material 100% RAP

3.4.2 Combinação de material RAP/granular

A deterioração estrutural é geralmente tratada pela reciclagem do pavimento existente em profundidades superiores a 200 mm. O material recuperado normalmente inclui as camadas superficiais e a base, normalmente compreendendo material superficial betuminoso (ex.: de RAP ou pedriscos envelhecidos) e material granular da base subjacente (ex.: pedras britadas ou cascalho previamente estabilizado). A deterioração desses pavimentos normalmente se manifesta na forma de rachaduras graves da camada superficial, em camadas granulares deformadas e em buracos. As demandas de capacidade estrutural e o tipo de tráfego que circula sobre a via ditarão em grande escala se os materiais recuperados do pavimento existente são suficientemente fortes ou se eles precisarão de um beneficiamento por meio de estabilização, conforme a discussão abaixo.

Sem agentes estabilizadores

A recuperação pela reciclagem da parte superior de um pavimento existente nem sempre exige a adição de agentes estabilizadores para a melhoria das propriedades de engenharia do material reciclado. Os dois tipos de tratamento discutidos abaixo são geralmente considerados quando a estrada apresenta volumes de trânsito relativamente baixos.

- **Reprocessamento.** Estradas com camada de rolamento ou sem uma camada superficial de asfalto, construídas com materiais naturais, são normalmente recuperadas ou asfaltadas por meio da reciclagem do material existente de sua base. O objetivo principal desse tipo de reciclagem é recuperar o material do pavimento existente que já atende aos requisitos de resistência. A água é adicionada durante a reciclagem até atingir o teor de umidade ideal para a compactação. O material misturado é depositado e compactado conforme a espessura correta da camada, forma e densidade superficiais.

- **Modificação mecânica.** A deterioração superficial ou estrutural é às vezes causada pela deficiência mecânica do material da base existente (ex.: granulometria ou plasticidade ruim). Essas deficiências podem, às vezes, ser tratadas a um custo mínimo com a combinação do material da base existente com um material externo adequado (ex.: britas graduadas) espargido como uma camada sobre a superfície da camada de rolamento antes da reciclagem. A água é adicionada durante o processo de reciclagem até atingir o teor de umidade ideal para a compactação. O material misturado é depositado e

Mechanical modification achieved by spreading new material before recycling

compactado conforme a espessura correta da camada, forma e densidade superficiais. Modificação mecânica alcançada com o espargimento de novos materiais antes da reciclagem

Deve-se observar que a mistura de material argiloso com areia com o uso dessa técnica nem sempre é bem-sucedida, principalmente se o teor de umidade da argila estiver acima do nível ótimo. Nessas condições, é melhor "pulverizar" o material argiloso in situ com uma recicladora e proporcionar a secagem do material fofo. O material solto então deve ser formatado e compactado antes da colocação da areia externa, com o uso da recicladora para misturar o material em uma segunda passada.

Com agentes estabilizadores
Os agentes estabilizadores são utilizados para melhorar as propriedades de engenharia do material, sendo que diferentes estabilizadores são usados para beneficiar diferentes propriedades. Por exemplo, a estabilização com cal hidratada reduz a suscetibilidade à umidade de um material ao modificar sua fração argilosa, enquanto agentes estabilizadores betuminosos aumentam a resistência à flexão de um material. Essas questões serão tratadas no capítulo seguinte.

Se a capacidade estrutural de um pavimento existente precisar de beneficiamento para atender maiores demandas de tráfego, a profundidade da reciclagem será geralmente aumentada para alcançar a espessura da nova camada estabilizada, o que produzirá a capacidade adicional necessária. Entretanto, isso só é possível se o pavimento existente tiver camadas com materiais de boa qualidade que sejam suficientemente espessos para lidar com esse aumento na profundidade da reciclagem.
Se essas condições não forem atendidas, uma camada de material externo pode ser incorporada e espargida sobre a camada de rolamento existente antes da reciclagem, assim alcançando o aumento de espessura necessário.

Vias não asfaltadas são geralmente asfaltadas com a reciclagem da camada de desgaste de cascalho com o agente estabilizador adequado. A melhoria dessas vias por meio do seu asfaltamento é normalmente realizada pelos seguintes motivos:

- **Economia.** Altos custos normalmente associados ao aumento do volume de trânsito;
- **Questões ambientais.** A perda anual de cascalho de 25 mm a 50 mm é comum em vias não asfaltadas, o que exige a recolocação contínua de cascalho com material trazido de empréstimos. Além disso, a poeira gerada pelas rodovias com revestimento primário é a causa de problemas de saúde para os residentes locais e pode causar prejuízos sérios à agricultura.
- **Decisões estratégicas.** Questões de segurança em condições molhadas e/ou prioridades políticas.

Uma vez que o requisito de capacidade estrutural dessas estradas é geralmente baixo (< 300.000 ESALs), a espessura do material da camada de desgaste encascalhada é normalmente reciclada entre 100 mm e 150 mm na estabilização com betume. A estabilização com cimento ou cal hidratada exige que a profundidade de reciclagem seja aumentada para alcançar entre 175 mm e 200 mm para produzir um desempenho estrutural semelhante. A nova camada de base é normalmente revestida com um tratamento superficial com pedriscos relativamente leves, com um ligante modificado com polímero sobre a base cimentada.

Se a base existente for construída originalmente com material estabilizado com cimento, a deterioração será geralmente uma consequência da rachadura por contração que se manifestará como rachaduras em bloco na superfície. A distância entre as rachaduras diminui com o tempo e o nível de deterioração aumenta (normalmente associado ao ingresso da água e ao bombeamento) até alcançar um estágio que requer uma medida de recuperação. Esses materiais anteriormente estabilizados geralmente podem ser reciclados e reestabilizados.

3.5 Vantagens da reciclagem a frio

Algumas das principais vantagens que podem ser alcançadas com a adoção da reciclagem a frio na recuperação de pavimentos são:

- **Vantagens ambientais.** A utilização do material do pavimento existente é total e o volume de novos materiais que precisam ser trazidos à obra de pedreiras é minimizado. Em decorrência disso, o transporte é drasticamente reduzido, assim como os danos causados por caminhões pesados transitando nas proximidades da obra. A energia total consumida pela reciclagem é significativamente menor se comparada a todas as outras opções de recuperação.

- **Qualidade da camada reciclada.** Uma mistura consistente e de alta qualidade dos materiais in situ, com água e agentes estabilizadores, é produzida com o uso de recicladoras modernas. Os sistemas de bombeamento controlados por microprocessadores garantem a adição precisa de fluidos (água e agentes estabilizadores). O padrão de ferramentas e o método de montagem no cilindro de corte são especificamente projetados para promover a mistura e alcançar um produto homogêneo.

- **Integridade estrutural.** As recicladoras modernas são capazes de produzir camadas espessas de material ligado que são homogêneas e não contêm interfaces fracas entre as camadas mais finas do pavimento (efeito de laminação).

- **A perturbação do subleito é minimizada.** A perturbação da estrutura subjacente da estrutura do pavimento é mínima, já que a reciclagem é tipicamente uma operação de uma única passada e as rodas da recicladora não entram em contato com as camadas inferiores pois se deslocam sobre a superfície do material reciclado.

- **Tempo de construção mais curto.** As recicladoras são capazes de altas taxas de produtividade, o que reduz de forma significativa os tempos de construção se comparados a outros métodos alternativos de recuperação. O tempo mais curto de construção reduz os custos da obra. Outros benefícios são oferecidos ao usuário da estrada, já que o trânsito sofre interferência por períodos mais curtos.

- **Segurança.** Uma das maiores vantagens desse processo é que ele proporciona níveis relativamente altos de segurança de trânsito. Toda a operação de reciclagem pode ser acomodada no limite da largura de uma faixa de trânsito. Em estradas com duas faixas, a reciclagem é normalmente realizada nas metades das larguras, acomodando o trânsito de uma mão na metade oposta durante o horário de trabalho. A largura total da rodovia pode ser aberta ao trânsito fora do horário de trabalho, inclusive a faixa reciclada que for concluída.

- **Eficácia em custos.** Todas as vantagens listadas acima se combinam para fazer da reciclagem a frio o processo mais atrativo de recuperação de pavimentos em termos da relação entre custo e eficácia.

3.6 Aplicabilidade do processo de reciclagem a frio

Cada obra de recuperação de estradas é diferente em termos da estrutura do pavimento existente, da qualidade dos materiais nas várias camadas do pavimento e dos requisitos de vida útil. O método com a melhor relação de custo e benefício de recuperação sempre dependerá de cada obra. Por isso, é importante definir a solução mais adequada para cada obra, sendo que essa solução pode não ser necessariamente com base na reciclagem. Os seguintes fatores importantes precisam ser levados em consideração na avaliação da adequação da reciclagem para cada obra específica:

- **Tipo de obra.** A solução mais eficaz em um dado país ou região será influenciada pelo ambiente local; se a obra passa por uma via urbana altamente transitada em que somente o trabalho noturno será permitido, ou uma via rural com revestimento primário que precisa urgentemente de melhorias. Soluções e níveis de serviço muito diferentes são necessários nesses dois casos extremos. É importante levar em conta os padrões locais de construção de estradas e as percepções da população local em relação aos níveis de serviço que eles consideram aceitáveis.

- **Ambiente físico.** A topografia local deve ser considerada na definição do método mais adequado de recuperação. Particularmente, gradientes acentuados podem ditar o tipo de construção possível e viável. O clima desempenha um papel vital na escolha. Soluções que atendem aos requisitos em pavimentos de uma região seca certamente não serão adequadas em áreas com altos índices de precipitação, sendo que o efeito de extremos de temperatura também influenciará a adequação de diferentes opções.

- **Disponibilidade de materiais.** A viabilidade de várias opções de reciclagem será influenciada de maneira significativa pela disponibilidade de materiais de construção, principalmente agentes estabilizadores. Eles devem ser disponibilizados para compra em quantidades suficientes, com qualidade consistente e aceitável. As recicladoras consomem grandes quantidades de água e agentes estabilizadores, sendo necessário, no começo da obra, definir se os volumes necessários podem ser encontrados e disponibilizados com confiabilidade.

O capítulo seguinte trata dos agentes estabilizadores, principalmente aqueles geralmente utilizados com materiais reciclados. No passado, o cimento era mais usado que todos os outros agentes estabilizadores combinados mas, em decorrência da rigidez introduzida por esse tratamento, a tendência atual é no sentido da adoção da estabilização com betume para proporcionar uma durabilidade por meio do aumento da flexibilidade.

4 Agentes estabilizadores

4.1	**Tipos de agentes de estabilização**	**103**
4.1.1	Geral	103
4.1.2	Comportamento do material	104
4.1.3	Agentes estabilizadores de cimento	105
4.1.4	Agentes estabilizadores de betume	106
4.1.5	Resumo dos diferentes agentes estabilizadores	109
4.2	**Estabilização com cimento**	**110**
4.2.1	Geral	110
4.2.2	Fatores que afetam a resistência	110
4.2.3	Rachaduras das camadas estabilizadas com cimento	111
4.2.4	Fragmentação superficial	114
4.2.5	Questões de durabilidade	115
4.2.6	Trabalhando com cimento	116
4.2.7	Tráfego precoce	120
4.2.8	Principais características dos materiais estabilizados com cimento	121
4.3	**Estabilização com betume**	**123**
4.3.1	Visão geral	123
4.3.2	Mecanismos de deterioração de materiais estabilizados com betume	126
4.3.3	Principais determinantes do desempenho de materiais estabilizados com betume	127

4.3.4	Material a ser estabilizado com betume	128
4.3.5	Agentes estabilizadores de betume	136
4.3.6	Filler ativo	140
4.3.7	Qualidade da água	141
4.3.8	Procedimento do projeto de mistura	142
4.3.9	Classificação dos materiais estabilizados com betume	144
4.3.10	Trabalhando com materiais estabilizados com betume	146
4.3.11	Ensaios mecânicos	152
4.3.12	Abordagens do projeto do pavimento para materiais estabilizados com betume	154
4.4	**Resumo: Vantagens e desvantagens dos agentes estabilizadores de cimento e betume**	**160**

Há mais de dois mil anos, a tecnologia pioneira de construção de estradas dos habitantes da Babilônia e Mesopotâmia foi desenvolvida ainda mais pelos romanos. Além dos seus sistemas avançados de pavimentação em bloco (pedras de calçamento), os romanos também usaram uma forma de tratamento com cal para melhorar a resistência do pavimento para suportar carroças de transporte com carga pesada. Hoje, muitos tipos de agentes estabilizadores são usados no mundo todo para superar as limitações inerentes dos materiais naturais. Além de aumentar as características de resistência e a rigidez de um material, os agentes estabilizadores melhoram a durabilidade e a resistência aos efeitos da água e do meio ambiente.

Materiais de construção de estradas de boa qualidade estão se tornando cada vez mais escassos em muitas partes do mundo onde, muitas vezes, simplesmente não há sua disponibilidade. O impacto econômico e ambiental da importação e do transporte de um material adequado tem incentivado a inovação e a formulação de soluções alternativas, tais como o desenvolvimento de técnicas de estabilização que utilizem recursos disponíveis localmente. A resistência e a rigidez necessárias da camada podem ser normalmente alcançadas com o uso de um material local “marginal” com a adição de pequenas quantidades de agentes estabilizadores a um custo relativamente baixo. Essas técnicas podem ser aplicadas à reciclagem assim como a novas construções. Com a adição de agente estabilizador, o material recuperado do pavimento existente pode ser melhorado, assim eliminando a necessidade de importar novos materiais para alcançar a resistência requisitada na estrutura do pavimento recuperado.

O objetivo dos agentes estabilizadores, do seu comportamento e, o mais importante, dos principais fatores que influenciam sua seleção ou exclusão deve ser claramente entendido. Este capítulo tem como objetivo tratar dessas questões e eliminar quaisquer ideias equivocadas.

4.1 Tipos de agentes de estabilização

4.1.1 Geral

Atualmente, uma série de agentes estabilizadores é usada no mundo todo, incluindo:

- Agentes úmidos, ou seja, surfactantes (agentes superficiais ativos), ex.: óleos sulfonatados
- Sais higroscópicos, ex.: cloreto de cálcio
- Polímeros naturais e sintéticos
- Ceras modificadas
- Resinas de petróleo
- Betume
- Estabilizadores cimentados, ex.: cimento, cal, cinzas volantes, etc.

Todos os agentes estabilizadores têm como objetivo ligar partículas de agregados individuais para aumentar a resistência e a rigidez e/ou aumentar a impermeabilidade e durabilidade dos materiais. Alguns agentes são mais eficazes que outros quando usados com materiais específicos e alguns apresentam claras vantagens de custo, mas todos têm o seu lugar no mercado e a maioria apresenta o melhor desempenho de aplicação com recicladoras modernas.

Novos produtos comerciais são desenvolvidos continuamente, sendo importante e justo que o setor os experimente. A inovação deve sempre ser promovida já que nenhum agente estabilizador único representa a melhor opção para todas as aplicações. Os engenheiros devem manter uma abordagem de mente aberta ao enfrentar a tomada de decisão em relação ao uso de agentes em uma obra específica. Essas decisões devem ser invariavelmente influenciadas, em ordem de importância, pelo seguinte:

- **Preço:** O custo unitário da estabilização sempre será uma preocupação primária;
- **Disponibilidade:** Alguns agentes estabilizadores podem não estar disponíveis em algumas regiões. Por exemplo, a emulsão betuminosa não é produzida em alguns países;
- **Características materiais:** Alguns agentes estabilizadores são mais eficazes que outros em relação a alguns tipos de materiais. Por exemplo, a cal deve ser usada preferencialmente ao cimento para tratar de solos com alta plasticidade (IP >10);
- **Durabilidade:** Os efeitos desejados da estabilização devem permanecer eficazes pelo período de serviço; e
- **Política:** Alguns órgãos responsáveis pelas estradas têm políticas rígidas em relação ao uso de certos agentes estabilizadores, geralmente influenciados por experiências passadas.

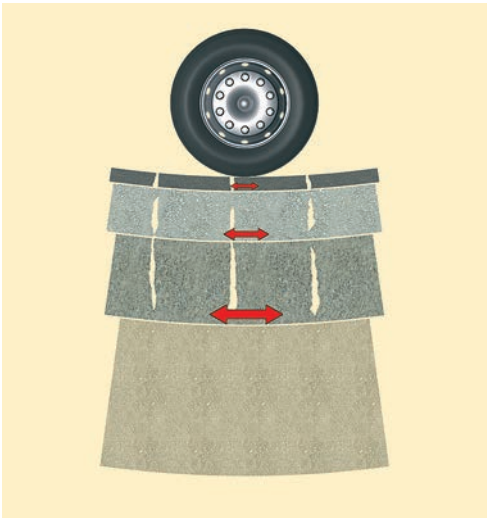
A abordagem adotada em relação aos agentes estabilizadores difere entre países e órgãos responsáveis pelas rodovias. No caso em que as diferenças são ditadas por políticas, geralmente elas são resultados empíricos e não de avaliação técnica sólida. A tecnologia não conhece fronteiras; as características de resistência medidas em qualquer lugar do mundo são comparáveis, desde que os materiais sejam semelhantes e que os critérios do ensaio sejam os mesmos. Portanto, não há razão para descartar um agente estabilizador que atenda a todos os requisitos técnicos pertinentes.

Ocupar a vanguarda tecnológica pode ser uma experiência arriscada e solitária. Os engenheiros são conservadores por natureza, por isso práticas reconhecidas e comprovadas são geralmente preferidas em relação à experimentação de novos produtos. Agentes estabilizadores cimentados e, em menor escala, seus pares betuminosos, já foram pesquisados amplamente. Eles são usados amplamente e existem métodos padronizados de ensaio para definir requisitos de projetos de mistura em níveis ótimos, bem como o atendimento à garantia de qualidade. Além disso, tanto o cimento como o betume são amplamente usados no setor de construção e têm uma disponibilidade praticamente no mundo todo. Por isso não é surpreendente que eles sejam os agentes estabilizadores mais conhecidos e, assim, o foco deste capítulo.

4.1.2 Comportamento do material

Materiais não ligados (granulares) em pavimentos flexíveis apresentam um tipo de comportamento dependente da tensão. Isso significa que quando confinados em uma camada de pavimento compactada, as características efetivas de rigidez aumentam à medida que o seu estado de carga aumenta. Quando esses materiais são carregados repetidamente em níveis de tensão que representam uma proporção significativa de sua resistência máxima, a deformação por cisalhamento ocorre. Essa deformação por cisalhamento se acumula, o que resulta em uma deformação permanente (trilha de roda).
A adição de um agente estabilizador liga as partículas do material, alterando o seu comportamento mediante uma carga, de forma que a camada de material ligado tende a atuar como uma laje, com diferentes padrões de tensão. A diferença fundamental na distribuição de tensão em relação a materiais ligados e não ligados (o cone que suporta a carga e a geração de tensões de flexão) é apresentada na figura abaixo.

É importante entender que asfalto a quente (HMA) e materiais estabilizados com betume (BSMs) são fundamentalmente diferentes. Conforme a explicação na Seção 1.2.2, embora o betume seja o ligante comum, a maneira pela qual o betume é disperso dentre as partículas de agregados é muito diferente. O asfalto a quente é um material ligado continuamente, enquanto os materiais estabilizados com betume são materiais ligados de forma não contínua. Materiais estabilizados com cimento também são muito diferentes dos materiais estabilizados com betume. A adição de cimento em um material promove a sua rigidez, enquanto a adição de betume tende a promover a sua flexibilidade. Além de serem continuamente ligados, os materiais estabilizados com cimento são propícios à contração que se manifesta em rachaduras em bloco na camada, o que é exacerbado pela repetição de cargas. Como podemos ver na figura abaixo, as tensões de tração se desenvolvem na parte inferior das camadas cons-



Materiais ligados = flexão

Materiais não ligados = “cone” de distribuição da tensão

truídas a partir de materiais ligados à medida que o pavimento se flexiona mediante uma carga.
A repetição de cargas (normalmente milhões de repetições) faz com que o material sofra falha por fadiga, ou rachaduras de baixo para cima. O tipo de ligante usado é um dos principais determinantes do número de repetições de carga que uma camada pode resistir antes do desenvolvimento de rachaduras. Esse princípio se aplica a materiais estabilizados com cimento e ao asfalto a quente.

Os materiais estabilizados com betume são menos rígidos que os materiais cimentados mas apresentam melhores propriedades de cisalhamento. O principal mecanismo de falha dos materiais estabilizados com betume é a deformação permanente sob carga. Os materiais estabilizados com betume com teores de betume de menos de 3% não sofrem rachadura por fadiga porque eles não são ligados continuamente. Esses conceitos serão discutidos nas seções seguintes.

4.1.3 Agentes estabilizadores de cimento

A cal, o cimento e combinações desses produtos com cinzas volantes, escórias de altos-fornos e outros materiais pozolânicos são os agentes estabilizadores mais comumente usados. Exceto pelos primeiros experimentos dos romanos com a cal como agente, o cimento tem sido o elemento usado há mais tempo. O primeiro registro de sua aplicação como um agente estabilizador formal foi nos EUA em 1917.
A principal função desses agentes é aumentar a resistência à carga. Isso pode ser alcançado com o aumento significativo da resistência à tração e à compressão do material ou com a redução de sua plasticidade. O cimento é o estabilizador que fornece o melhor resultado no aumento da resistência. A cal liberada durante o processo de hidratação reage com quaisquer partículas de argila que possam estar presentes, assim reduzindo sua plasticidade. A cal, entretanto, é composta predominantemente de cal livre, sendo utilizada preferencialmente como agente estabilizador para materiais mais plásticos (IP>10%). O uso de cimento e misturas de cimento deve se limitar ao tratamento de materiais com um Índice de Plasticidade inferior (IP) a 10. A resistência alcançada é regida pela quantidade de agente estabilizador adicionado e pelo tipo de material sendo tratado. Devemos, entretanto, reconhecer que a adição de mais cimento para a obtenção de maiores níveis de resistência poderá ocorrer em detrimento do desempenho da camada. Os agentes estabilizadores cimentados produzem materiais quase quebradiços. O aumento da resistência de uma camada estabilizada resulta no aumento de sua fragilidade, com uma consequente redução de sua flexibilidade. Níveis mais altos de resistência na camada cimentada atraem mais tensões da carga de roda como consequência. Isso invariavelmente levará a uma proliferação acelerada de rachaduras mediante cargas repetidas de trânsito pesado, assim reduzindo seu desempenho estrutural.
Por isso, é importante que os requisitos de desempenho da camada estabilizada sejam claramente entendidos e que o projeto de mistura adequado seja conduzido com amostras representativas para a definição da taxa correta de aplicação de estabilizador.

Observação:

- A estabilização de cimento aumenta a resistência e a rigidez mas introduz rachaduras por contração.

4.1.4 Agentes estabilizadores de betume

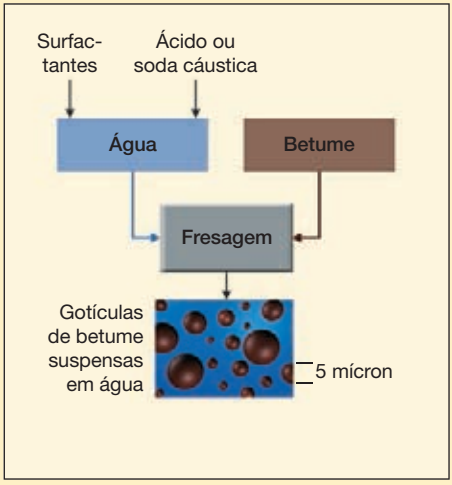
Em virtude dos grandes avanços tecnológicos (procedimentos de projeto e métodos de construção) e a vantagens decorrentes (econômicas e ambientais), o uso de betume como agente estabilizador tem se tornado cada vez mais comum. Embora existam muitas formas de betume, somente duas são usadas como agentes estabilizadores: emulsão betuminosa e espuma de asfalto, ambas produzidas a partir de betume de classificação rodoviária relativamente mole (e.g. 80 Pen). Ambas as formas podem ser usadas para tratar uma ampla série de materiais de pavimento, dispersando o betume de maneira não contínua, a marca dos materiais estabilizados com betume. O tratamento de um material com betume diluído não é um processo de estabilização, já que o betume se dispersa de maneira contínua, como no asfalto.

Os materiais estabilizados com betume não sofrem com o fenômeno de rachadura por contração ligado à estabilização com cimento. Uma camada construída a partir de materiais estabilizados com betume é relativamente flexível comparada a uma camada do mesmo material tratado com cimento. Os materiais estabilizados com betume podem ser transitados imediatamente após a construção devido ao aumento substancial da coesão realizado quando o material é compactado. Essa coesão reduz a tendência do material a se esfacelar mediante a ação do trânsito. A estabilização por betume melhora a resistência de um material e reduz os efeitos adversos da água.

A seguir, descreveremos os dois agentes estabilizadores betuminosos e explicaremos suas principais diferenças.

Emulsão betuminosa

Esse ligante consiste em betume emulsificado em água. O betume é disperso na água na forma de um tipo de emulsão betuminosa de óleo em água. O betume é mantido em suspensão por um agente emulsificante, que define a carga da emulsão betuminosa. A emulsão betuminosa catiônica tem uma carga positiva; a emulsão betuminosa aniônica tem uma carga negativa. A emulsão betuminosa é produzida em uma usina especializada e tem uma vida útil de vários meses em barris, desde que armazenada de forma adequada.



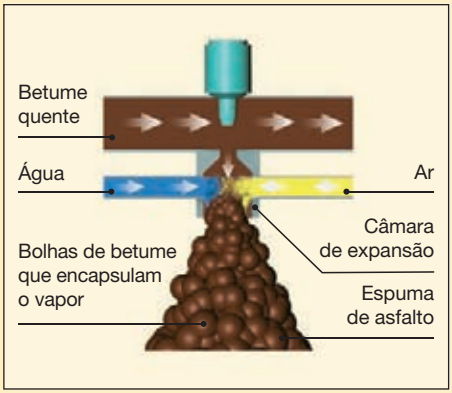
Produção de emulsão betuminosa

Quando uma emulsão é misturada com agregados, as gotículas betuminosas carregadas são atraídas às partículas dos agregados de carga oposta, concentrando-se nas frações menores devido à sua área superficial e características de concentração de carga. A umidade e o tipo de agregados desempenham um papel importante na dispersão da emulsão betuminosa e na "quebra" (separação do betume da água) durante a mistura. Uma vez que a emulsão betuminosa atua como um lubrificante, a quebra deve ocorrer somente depois que o material for compactado. O material tratado terá uma aparência "malhada" devido à concentração de betume nas partículas mais finas (como ilustrado no Capítulo 1), resultando em ligações localizadas e não contínuas ("solda a ponto").

O material estabilizado com a emulsão betuminosa é chamado de emulsão BSM (de materiais estabilizados com betume).

Espuma de asfalto

O ligante é produzido pela injeção de água no betume quente, resultando na espuma espontânea. As propriedades físicas do betume são temporariamente alteradas com a injeção de água que, em contato com o betume quente, é explosivamente transformada em vapor, que é preso em milhares de pequenas bolhas betuminosas. O processo de espuma ocorre em uma câmara de expansão (um tubo relativamente pequeno com paredes espessas de aço, aproximadamente 50 mm de profundidade e diâmetro) em que betume e água (mais ar em alguns sistemas) são injetados a alta pressão. As bolhas de espuma de asfalto se desmancham em menos de um minuto.



Produção de espuma de asfalto na câmara de expansão

A espuma de asfalto é produzida na câmara de mistura e incorporada ao agregado enquanto ainda estiver em seu estágio espumoso "instável". Quanto maior o volume da espuma, melhor será a distribuição do betume no agregado.

Durante a mistura, as bolhas betuminosas estouram, produzindo pequenas divisões betuminosas que se dispersam pelo agregado pela adesão de partículas mais finas (areia fina e menor) para formar um mástique (como ilustrado na Seção 1.2.2). O teor de umidade do material antes da mistura desempenha um papel importante na dispersão do betume. Com a compactação, as partículas de betume no mástique são pressionadas fisicamente contra as partículas de agregados maiores, onde se aderem, resultando em ligações localizadas e não contínuas ("solda a ponto").

Os materiais estabilizados com espuma de asfalto são chamados de espuma de BSM (materiais estabilizados com betume).

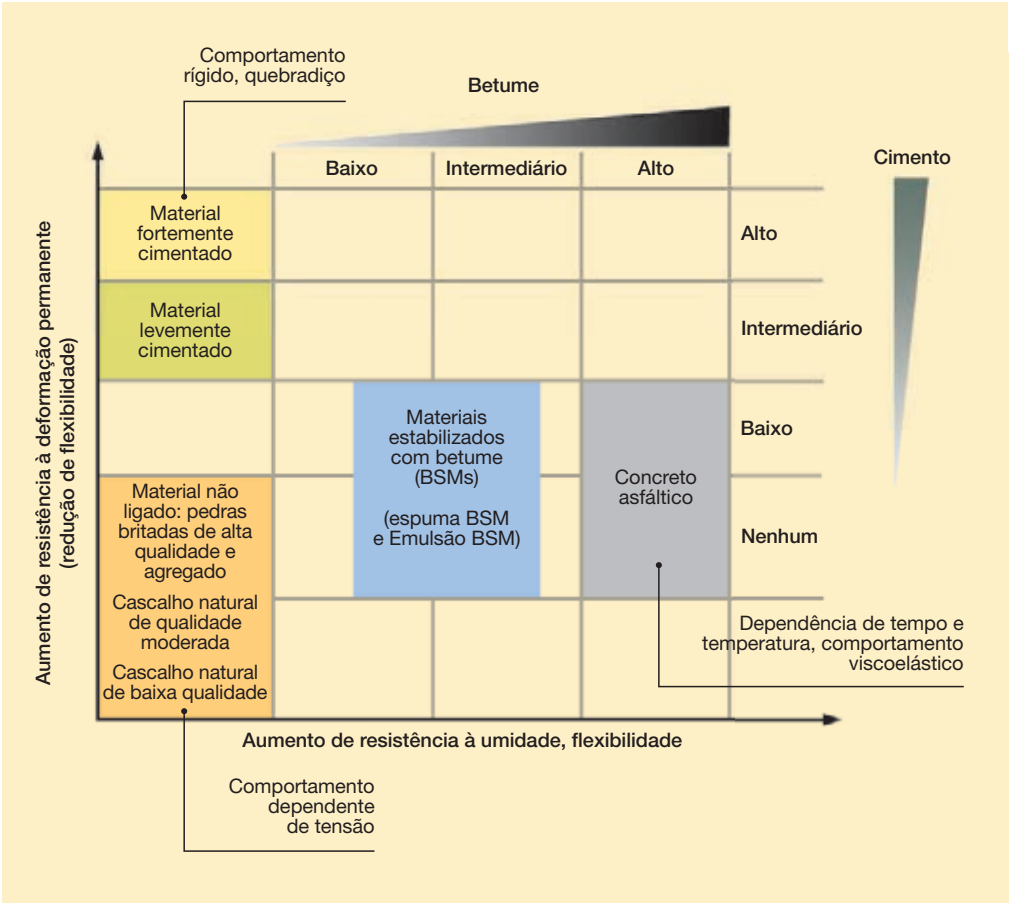
A prática atual prefere tratar a emulsão de BSM e espuma de BSM igualmente em termos de suas propriedades de desempenho. As principais características comportamentais dos materiais estabilizados com betume são:

- Um aumento significativo na coesão em relação aos materiais granulares, sem nenhuma redução significativa do ângulo de atrito;
- Aquisição de resistência de flexão devido às propriedades viscoelásticas do betume;
- A melhoria da resistência à umidade e a durabilidade em relação ao material granular.

Alguns materiais tratados com agente estabilizador betuminoso apresentam propriedades de resistência retida ruins (ou seja, eles perdem resistência quando imersos em água). Isso pode ser tratado com a adição de um filler ativo, como a cal hidratada ou o cimento. Pequenas quantidades de filler ativo (1% por massa) podem aumentar significativamente a resistência retida sem afetar a flexibilidade da camada. O filler ativo atua como um catalisador de dispersão com espuma de asfalto e promove a quebra quando usado com emulsão betuminosa. Por isso, a prática comum é usar cimento ou cal hidratada em combinação com agentes estabilizadores betuminosos.

4.1.5 Resumo dos diferentes agentes estabilizadores

Conceitualmente, o efeito da adição de cimento e/ou betume ao material do pavimento e as propriedades dos diferentes produtos estão ilustrados na figura abaixo.



Comportamento dos materiais do pavimento

4.2 Estabilização com cimento

4.2.1 Geral

O cimento é o agente estabilizador mais usado, sendo que sua utilização no mundo todo ultrapassa todos os outros agentes estabilizadores somados. As principais razões disso são custo e disponibilidade. O cimento é produzido na maioria dos países e seu preço é relativamente baixo. Outro motivo é seu histórico comprovado como um material de construção. Existe uma ampla gama de padrões, métodos de ensaio e especificações disponíveis, sendo que as camadas estabilizadas com cimento têm produzido um nível excelente de serviço em milhares de quilômetros de estradas.

A estabilização com cimento, entretanto, requer uma abordagem adequada de projeto. A principal função da adição de cimento é o ganho de resistência, sendo que a resistência à compressão não confinada atingiu uma situação de aceitação global como o principal critério de projeto. Entretanto, muitos fatores além da resistência à compressão não confinada (UCS) precisam ser considerados, tais como a taxa de ganho de resistência, a resistência de tração indireta (ITS), o potencial de rachaduras e questões de durabilidade. Essas questões serão tratadas nas seções seguintes.

4.2.2 Fatores que afetam a resistência

A resistência à tração compressiva alcançada no material estabilizado com cimento é amplamente determinada pela quantidade de cimento adicionado, pelo tipo de material, pela densidade do material compactado e pela extensão da cura. A resistência geralmente aumenta em uma relação linear com o teor de cimento, mas a taxas diferentes para materiais diferentes e de acordo com o tipo de cimento. A densidade desempenha um papel importante na definição da resistência enquanto a temperatura ambiente afeta diretamente a taxa de ganho de resistência. Quanto mais alta a temperatura ambiente, mais rápida é a taxa de ganho da resistência.

Ligações cristalinas começam a se formar entre as partículas assim que o cimento entra em contato com a água no processo de mistura. Algumas dessas ligações são destruídas quando o material é compactado, assim reduzindo a resistência que pode ser alcançada. Além disso, essa ligação tem o efeito de redução da densidade máxima que pode ser alcançada. Por isso, é importante acelerar as operações de pavimentação e compactação e concluí-las o mais rápido possível depois da reciclagem, para alcançar a densidade máxima e obter a resistência antecipada do material compactado.

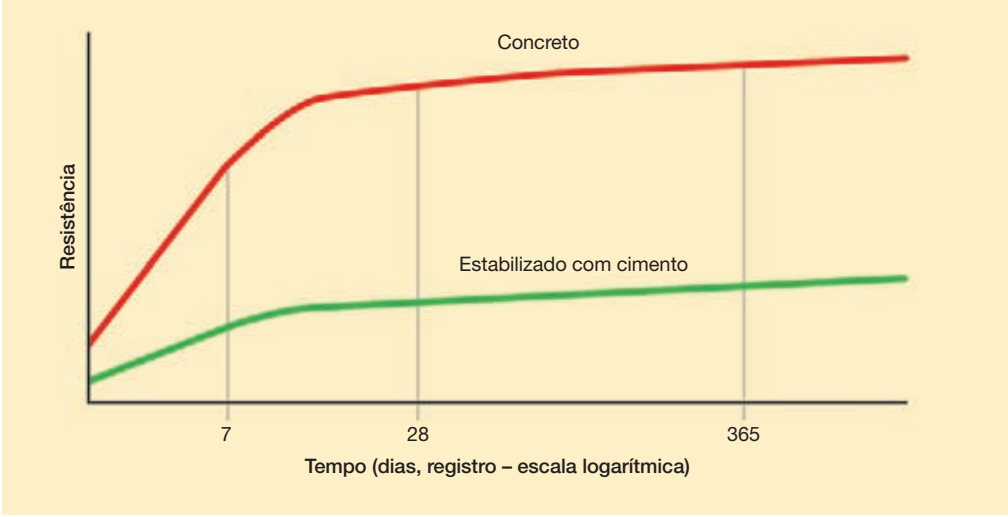
Isso é particularmente importante no caso de temperaturas ambientes acima dos 40ºC e se o material for suscetível a um ganho rápido de resistência (ex.: reação de sílica amorfa). Em tais condições, um agente estabilizador alternativo ao cimento Portland deve ser investigado, tais como as misturas de escória e/ou cal, com uma taxa mais baixa de ganho de resistência. Também devemos observar que quanto mais fino o pó do cimento, mais rápida a sua taxa de cimentação.

Observação:

- A resistência do material cimentado geralmente aumenta em uma relação linear com o teor de cimento.

4.2.3 Rachaduras das camadas estabilizadas com cimento

Todos os materiais tratados com cimento, inclusive o concreto, são suscetíveis a rachaduras. A taxa de ganho de resistência à compressão e à tração no material estabilizado com cimento é uma função do tempo, conforme podemos observar no gráfico. As tensões de tração se desenvolvem dentro do material tratado com cimento em decorrência da contração e/ou do tráfego, e se elas excederem a resistência à tração naquele momento, as rachaduras ocorrem.



Relação resistência/tempo para materiais cimentados

Essas rachaduras podem ser controladas e não são necessariamente prejudiciais. Entretanto, é importante reconhecer que o material tratado com cimento tende a rachar por dois motivos muito diferentes. O primeiro motivo é a contração que é uma função da reação química que ocorre quando o cimento se hidrata na presença da água e, assim, não é um fenômeno induzido pelo tráfego. O segundo motivo é causado pela repetição de cargas de trânsito com o passar do tempo. O início das rachaduras e a sua propagação são processos totalmente diferentes, por isso devem ser considerados separadamente.

Rachaduras por contração. As rachaduras são inevitáveis quando o material é tratado com cimento. À medida que o cimento se hidrata, cristais de silicato de cálcio em "forma de dedos" se formam, ligando as partículas do material. Além da geração de calor, inúmeras outras mudanças ocorrem durante essa reação química. Com o desenvolvimento das ligações, o material passa por uma alteração de volume e se contrai, causando rachaduras normalmente chamadas de rachaduras por contração. Essas rachaduras por contração são inevitáveis, sendo uma das características do trabalho com o cimento.

A intensidade (espaçamento entre as rachaduras) e a magnitude (largura das rachaduras), conhecidas coletivamente como o grau de rachadura, são influenciadas amplamente pelo seguinte:

- **Teor de cimento.** A contração que ocorre durante a hidratação é uma função da quantidade de cimento presente. O aumento do teor de cimento aumenta o grau de rachadura, sendo um dos motivos para a diminuição da adição apenas para atender aos requisitos de projeto. Entretanto, como discutido abaixo, os requisitos de resistência e durabilidade devem ser balanceados, e nem sempre é possível manter a adição de cimento em um nível baixo.
- **Tipo de material sendo estabilizado.** Alguns materiais tendem a se contrair mais que outros quando tratados com cimento. Além disso, alguns materiais plásticos tendem a ser ativos, apresentando mudanças significativas de volume entre os estados úmido e seco. Se o índice de plasticidade do material for superior a 10, a adição de cal, ou uma combinação de cal e cimento, deverá ser utilizada para reduzir sua plasticidade, sendo que o ideal seria atingir um estado não plástico.
- **Teor de umidade da compactação e proporção de cimento: Água.** O grau de rachadura é uma função da quantidade de umidade que é perdida à medida que o cimento se hidrata e o material seca. A restrição do teor de umidade (reduzindo a proporção de água:cimento) no momento da compactação a um nível inferior a 75% de teor de umidade saturado pode reduzir de forma significativa o grau das rachaduras;
- **A velocidade da secagem.** Quando o material tratado com cimento se contrai, as tensões internas são induzidas dentro do material. O grau de rachadura é amplamente definido pela taxa do desenvolvimento da resistência em relação à taxa de desenvolvimento da tensão de contração. Se o material secar rapidamente, então as tensões de contração serão inevitavelmente maiores que o desenvolvimento da resistência e o padrão de rachaduras será intenso (2 m x 2 m), com rachaduras estreitas (tipicamente como um fio de cabelo). A secagem lenta resultará no desenvolvimento de um padrão menos intenso (6 m x 4 m), com rachaduras mais largas. A cura adequada da camada concluída evitará que a superfície seque demais, assim reduzindo a intensidade e a magnitude das rachaduras; e
- **Ligações entre camadas.** Uma interface agitada com uma boa ligação entre a camada cimentada e a camada subjacente resultará em uma alta intensidade de rachaduras em linha, conforme descrito acima. Esse cenário de atrito total entre as camadas é o mais comum. Entretanto, em casos excepcionais, uma ligação ruim entre as camadas poderá ocorrer, o que resulta em um padrão menos intenso com rachaduras mais largas.

Uma característica das rachaduras por contração é que elas são mais largas na parte superior que

na parte inferior (a secagem inicia na superfície) e a sua face vertical é irregular, permitindo a transferência eficaz de cargas de tráfego por toda a rachadura.

Rachaduras causadas pelo trânsito. Essas rachaduras ocorrem em decorrência de tensões repetidas de tração induzidas por cargas de tráfego na camada estabilizada com cimento. A rachadura inicia na parte inferior da camada, onde as tensões de tração são máximas, causando a deformação máxima. Sendo um material semiquebradiço com propriedade de flexão relativamente ruim, as camadas tratadas com cimento são extremamente sensíveis à sobrecarga.

Mesmo na ausência de sobrecargas, os danos do trânsito contínuo acumulam-se na camada cimentada, o que resulta, em última análise, em uma rachadura por fadiga. Depois de iniciadas, as rachaduras levam algum tempo para se propagarem pela superfície da camada. Em seu estado pós-rachadura, a camada ainda é capaz de suportar cargas de tráfego, sendo que tal estado pode ser modelado com a redução do módulo efetivo da camada tratada com cimento. A intensidade e a magnitude da rachadura aumentam à medida que a camada se deteriorar ainda mais mediante repetidas cargas de tráfego. Isso reduz o módulo efetivo que, por sua vez, aumenta a deflexão mediante cargas, assim promovendo um processo contínuo de degradação até que o material atinge seu estado granular anterior à estabilização. É importante observar que a taxa de degradação se acelera depois que as rachaduras atingem a superfície e permitem que a água penetre no pavimento mais livremente. Quanto mais molhada a região, maior o risco dessa deterioração acelerada pela umidade.

Rachaduras causadas pelo trânsito

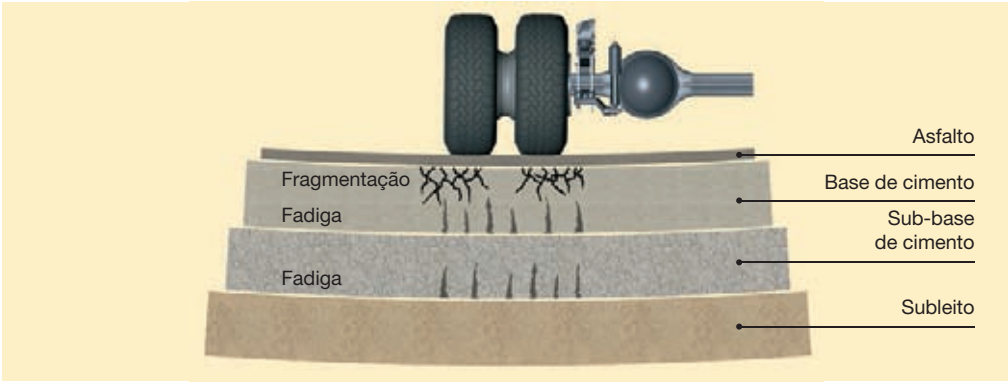
4.2.4 Fragmentação superficial

A fragmentação ocorre na parte superior da camada de base estabilizada com cimento quando tensões induzidas por tráfego ultrapassam a resistência à compressão do material. Esse mecanismo de falha foi inicialmente identificado em camadas de base levemente cimentadas com tratamentos superficiais relativamente finos sobre estradas com trânsito de cargas pesadas de carvão na África do Sul. As conclusões das pesquisas desse mecanismo demonstram que o potencial da falha por fragmentação depende de:

- resistência à compressão do material estabilizado na parte superior da camada;
- espessura e tipo da camada superficial; e
- pressão dos pneus e a carga por eixo aplicada.

Os procedimentos de projeto precisam lidar com essas condições. O aumento da resistência à compressão e da espessura das camadas estabilizadas e da camada superficial resolve o problema em grande parte. Entretanto, a sobrecarga permanece como uma das principais causas da falha prematura de pavimentos, principalmente se o controle de eixos for ineficaz. Além disso, o aumento da pressão dos pneus na última década exacerbou o potencial desse mecanismo de falha.

As camadas de base estabilizadas com cimento também são vulneráveis a falhas por fragmentação se forem sujeitas a cargas pesadas antes que a resistência tenha se desenvolvido o suficiente. Isso se aplica especialmente ao tráfego acomodado sobre camadas cimentadas recentemente construídas em vez de desvios. O cimento normalmente usado para a estabilização e a quantidade aplicada resultam em uma taxa relativamente lenta de ganho de resistência após a construção, levando aproximadamente 7 dias até alcançar 50% de seu nível máximo de resistência (e 90% após 28 dias). Assim, quando a meta de resistência à compressão não confinada de uma camada de base for 2 MPa, menos de 0,5 MPa terá sido alcançado depois de 3 dias, tornando a superfície particularmente vulnerável em caso de veículos pesados e lentos com altas pressões de pneu.



Mecanismos de falha das camadas cimentadas

4.2.5 Questões de durabilidade

A durabilidade do material natural está principalmente relacionada à intempérie e à degradação das partículas individuais mediante a influência das condições climáticas e a repetidas cargas de tráfego. Essa degradação é um processo lento, sendo que as propriedades do material permanecem razoavelmente constantes ao longo da vida útil da estrada, principalmente se forem utilizados materiais de qualidade mais alta. Entretanto, quando materiais de qualidade inferior são estabilizados com cimento, outros aspectos relativos à durabilidade precisam ser considerados. Mediante certas condições, suas propriedades podem se alterar em períodos curtos de tempo devido à carbonatação e a influências climáticas.

O ensaio CBR (Índice de suporte Califórnia) é amplamente usado como um indicador da resistência de suporte de materiais naturais, mas é inadequado com materiais cimentados de maior resistência. O ensaio da UCS (resistência à compressão não confinada) foi adotado, sendo que limites pertinentes são usados no mundo todo (ex.: máximo 4 MPa, mínimo 2 MPa). Entretanto, as pesquisas demonstram que somente a UCS não é um indicador confiável de durabilidade, pois um material estabilizado que atenda aos requisitos de UCS pode se deteriorar e se desintegrar em um período curto de tempo. Mais ensaios são necessários para garantir que o material estabilizado com cimento seja suficientemente durável, principalmente contra os efeitos potencialmente destrutivos da carbonatação.

A carbonatação é o nome dado à reação química complexa que ocorre entre o material cimentado e o dióxido de carbono na presença da água ou vapor (umidade). Em termos leigos, essa reação produz carbonato de cálcio a partir de íons livres de cálcio. As moléculas de hidróxido de cálcio (ou cal livre, Ca(OH)2, que estão sempre presentes em um material tratado com cimento) são convertidas em cal agrícola CaCO3 através do processo de carbonatação. Isso permite que a plasticidade (medida pelo índice de plasticidade) volte ao material e aumente rapidamente. A cal agrícola é útil para aumentar o pH mas não ajuda a reduzir o índice de plasticidade. A alteração da estrutura molecular durante a carbonatação também está associada à mudança de volume (diminuição ou aumento, dependendo da qualidade dos agregados e do tipo de estabilização química). Se as forças que emanam dessa mudança de volume ultrapassarem a resistência do material tratado com cimento, a destruição ocorrerá.

Esse fenômeno é bem conhecido na indústria de concreto, mas é raramente uma causa de preocupações, já que a resistência de tração do concreto é muito maior que as tensões induzidas pela carbonatação. Além disso, os agregados usados na produção do concreto são geralmente pedras britadas, com excelentes propriedades de durabilidade. Esse não é o caso em que materiais de baixa qualidade são estabilizados com um baixo índice de aplicação de cimento.

Muitos ensaios podem ser realizados em laboratório para definir o potencial de carbonatação, tais como o ensaio de molhagem/secagem com escova, a definição do consumo inicial de cal ou cimento e o valor de resistência à tração indireta. Como uma diretriz geral para a minimização do risco de carbonatação, uma quantidade suficiente de cimento deve ser adicionada para alcançar o valor mínimo de resistência à tração indireta de 250 kPa (independentemente se a resistência à compressão não confinada correspondente ultrapassar o limite prescrito) assim como o atendimento à demanda de consumo inicial de cimento.

Observação:

- O consumo inicial de estabilizador precisa ser atendido para evitar a carbonatação prematura (ou seja, problemas de durabilidade).

4.2.6 Trabalhando com cimento

As described above, one of the main concerns with cement treated material is the inevitable shrinkage cracking that occurs. However, the degree of cracking and the overall quality of stabilised layers are largely contingent on the following key factors:

Projeto de mistura. É de suma importância que o projeto de mistura adequado seja realizado com amostras verdadeiramente representativas do material a ser tratado com cimento. (Um exemplo desse procedimento laboratorial está incluído no Apêndice 1.) Diferentes materiais exigem diferentes taxas de aplicação de cimento para alcançar os objetivos de resistência e durabilidade.

Qualidade do cimento. O cimento tem uma vida útil definida e, como regra geral, não deverá ser utilizado mais de três meses depois da data de fabricação. A definição da idade do cimento é difícil, principalmente quando importado a granel. Se houver qualquer dúvida em relação à sua idade, ou outros aspectos de qualidade, amostras deverão ser submetidas a análises em laboratório para verificar parâmetros de resistência.

Tipo de cimento. Cimento moído fino com propriedade de endurecimento rápido nunca deve ser usado como agente estabilizador.

Uniformidade da aplicação. Dois métodos são bem conhecidos para a aplicação de cimento como agente estabilizador em obras de reciclagem. O primeiro esparge o pó de cimento seco sobre a parte superior da camada de rolamento existente antes da reciclagem, enquanto o segundo injeta uma lama de cimento na câmara de mistura durante a reciclagem.

- **Espargidores a granel.** Esse é o método mais amplamente usado para aplicação. Vários sistemas são usados para a distribuição do cimento na camada de rolamento com a taxa de espargimento exigida (correias transportadoras, dosadores helicoidais, sopradores pneumáticos), sendo que cada um tem seus próprios méritos e deméritos. O ensaio de "remendo em lona" é normalmente conduzido para verificar a taxa de aplicação. Todos os espargidores têm seus limites e devemos tomar precauções na tentativa de aplicar taxas muito baixas (< 2%). (Os espargidores da Streumaster podem atingir taxas de aplicação de < 2% de cimento ou cal com precisão aceitável.)

Qualquer forma de espargimento de cimento seco será afetada pelo clima, principalmente pelo vento e pela chuva. Sendo um pó fino (menor que 0,075 mm), o cimento é suscetível à erosão pelo vento, sendo imediatamente levado pelo ar com a ação de uma brisa, natural ou causada pelos caminhões passando, assim afetando a uniformidade da sua taxa de aplicação. Se a chuva entrar em contato com o cimento espargido, ela desencadeará um processo de hidratação. Se isso ocorrer, o cimento espargido deverá ser misturado imediatamente ou descartado.

Espargimento com uma Streumaster

Aplicação de cimento com uma Wirtgen WR 2500 SK (sem poeira)

- **Recicladora equipada com dispositivo de espargimento integrado.** A WR 2500 SK é a versão “estendida” da recicladora WR 2500 S de série, com um silo de 4 m³ integrado imediatamente atrás da cabine de comando. O cimento ou a cal são retirados desse silo por meio de uma comporta de roda celular e espargidos uniformemente na camada de rolamento imediatamente na frente da câmara de mistura. Esse sistema “livre de poeira” é muito preciso, com taxas de espargimento abaixo de 2% ou até 6%, resolvendo todas as preocupações climáticas relativas ao espargimento de cimento sobre a estrada à frente da recicladora.
- **Injeção de lama.** A Wirtgen WM 1000 foi desenvolvida especificamente para pré-misturar o cimento com a quantidade de água necessária para alcançar o teor de umidade ótimo para a compactação. A suspensão de lama assim formada precisa ser suficientemente líquida para ser bombeada até a recicladora e injetada na câmara de mistura através de uma barra de pulverização. A proporção de água:cimento fica normalmente na casa de 1:1, mas a maioria das aplicações de reciclagem exige mais água que cimento para alcançar o teor de umidade ótimo para compactação.

A aplicação de cimento como lama com o uso da Wirtgen WM 1000 (livre de poeira)

A injeção de lama é o meio mais eficiente de dispersão do cimento por todo o material reciclado. Esse método de aplicação é recomendado no caso de taxas de aplicação específicas (>4%) para reciclagem profunda (>200 mm) quando o espargimento a granel se torna pouco administrável devido simplesmente ao volume de cimento necessário por metro quadrado. Se a espessura da camada de cimento espargido na estrada ultrapassar 25 mm, um cuidado extremo deverá ser dispensado para a manutenção da consistência.

Além disso, baixas taxas de aplicação (1%), normalmente especificadas com a estabilização com um agente estabilizador betuminoso, apresentam melhor aplicação por meio da injeção de lama de cimento para garantir a uniformidade da aplicação por todo o material reciclado.

Além disso, a aplicação verdadeiramente livre de poeira alcançada com o uso desse método oferece vantagens ambientais significativas, tanto em termos de melhorias de saúde e segurança para os trabalhadores como na redução da poluição induzida pela ação do vento.

Uniformidade da mistura. Testes suficientes já foram realizados para provar que as capacidades de mistura de recicladoras de grande porte são semelhantes às de usinas misturadoras estacionárias, desde que a máquina seja operada com uma velocidade de avanço condizente com as condições específicas da obra (normalmente entre 8 m/min e 12 m/min). Por isso, não é necessária a aplicação de um "fator tradicional" às taxas de aplicação especificadas de cimento como um abono em relação a perdas e ineficiências locais.

Adição de água. O material tratado com cimento deve ser trabalhado o mais seco possível, tanto para minimizar rachaduras por contração como para prevenir o empolamento durante a compactação. Se a adição de água for necessária, ela sempre deverá ser injetada na câmara de mistura, e essa adição deve ser controlada cuidadosamente para a obtenção do teor de umidade que nunca exceda o teor de umidade ótima do material.

Cura. Depois da conclusão, a superfície de uma camada estabilizada com cimento não deve secar por um período de no mínimo sete dias. Como descrito acima, as rachaduras por contração se desenvolverão na superfície se a velocidade da secagem exceder a taxa de ganho de resistência. A secagem pode ser evitada com a aspersão superficial frequente com água de um caminhão-pipa equipado com uma barra de aspersão de largura total. Outros veículos não deverão transitar sobre a camada. De forma alternativa, um isolamento temporário poderá ser aplicado como uma membrana de cura. Como regra geral, os materiais tratados com cimento devem sempre ser cobertos o mais breve possível para minimizar os efeitos prejudiciais da secagem rápida e da carbonatação.

Temperatura. Se a temperatura ambiente for acima dos 35 ºC, pequenos trechos de estrada devem ser tratados e finalizados o mais rápido possível para evitar a compactação contra o ganho rápido e inevitável de resistência.
Devido à expansão que ocorre quando a água se resfria abaixo dos 4 ºC, nenhuma obra de estabilização com cimento deverá ser realizada mediante a previsão de clima com temperatura a ponto de congelamento.

Ensaios de controle. A qualidade da camada concluída é geralmente avaliada com base na resistência (resistência à compressão não confinada e resistência à tração indireta) das amostras coletadas atrás da recicladora. Durante esse procedimento, é importante monitorar regularmente o tempo que decorre entre a amostragem em campo e a compactação das amostras no laboratório. Esses ensaios devem simular as condições de campo. Qualquer retardamento significativo pode resultar em resistências ruins devido à hidratação e ao ganho de resistência que são posteriormente destruídos pela compactação.

4.2.7 Tráfego precoce

Fora do horário de trabalho normal às vezes toda a largura da estrada é aberta ao trânsito. Existem frequentes preocupações com o tráfego precoce sobre materiais estabilizados com cimento. Conforme discutido na Seção 4.2.4, essas preocupações são certamente justificáveis no caso da expectativa de cargas pesadas por eixo e se os procedimentos de cura não forem realizados. Permitir a secagem excessiva da superfície poderá gerar o esfacelamento e a perda de resistência na parte superior da camada e, em última instância, o desenvolvimento de buracos. A superfície deve ser, portanto, mantida em estado úmido com a aplicação leve e frequente de água.

4.2.8 Principais características dos materiais estabilizados com cimento

As três características mais importantes dos materiais estabilizados com cimento são:

Resistência. Tanto a resistência à compressão como à tração, medidas pelos ensaios UCS e ITS, respectivamente, são parâmetros importantes para a avaliação do material estabilizado com cimento.

- **O valor de UCS (resistência à compressão não confinada).** O ensaio de UCS é normalmente usado para avaliar os materiais cimentados. O valor de UCS é normalmente definido com amostras preparadas que curaram por 7 dias a temperatura de 22ºC e umidade acima de 95%. Alguns métodos de ensaio permitem que a cura seja acelerada.

A tabela abaixo mostra taxas típicas de aplicação de cimento (expressas em percentual de densidade seca de material reciclado compactado à densidade-alvo) para duas categorias de UCS: "levemente cimentados" (menos que 4 MPa) e "cimentados" (até 10 MPa).

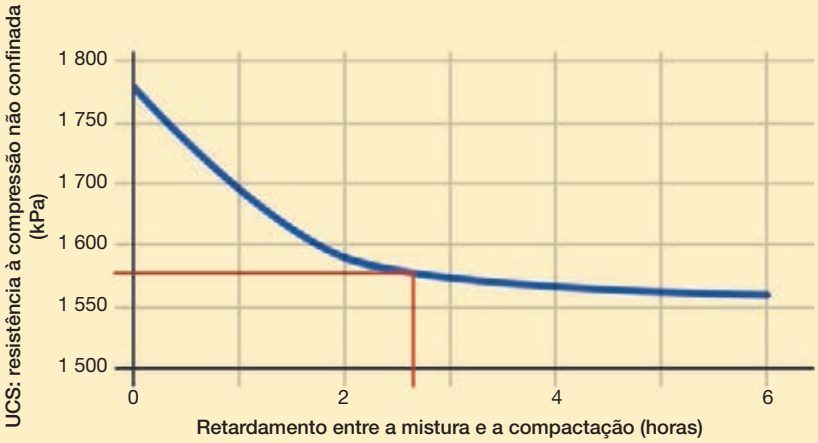
Cuidado: durante o trabalho com material graúdo. Devido ao aumento da probabilidade do desenvolvimento de "colunas de pedra" no corpo de prova, uma medição falsa da resistência à compressão não confinada próxima à resistência de uma rocha em vez da mistura estabilizada pode ser o resultado gerado. Medições inesperadamente altas devem, assim, ser investigadas pela inspeção visual da amostra para a definição da extensão da fragmentação do agregado que ocorreu durante o ensaio. A repetição de ensaios poderá ser necessária para se alcançar um resultado estatisticamente confiável.

Taxas típicas de aplicação de cimento (percentual por massa)		
Tipo de material	Valor UCS como objetivo	
	< 4 MPa	Até 10 MPa
RAP/pedras britadas (mistura meio a meio)	2,0 to 3,0	3,5 to 5,0
Britas graduadas	2,0 to 2,5	3,0 to 4,5
Cascalho natural (IP < 10, CBR >30)	2,5 to 4,0	4,0 to 6,0

- **O valor de ITS (resistência à tração indireta).** O ensaio de ITS demonstra maior sensibilidade ao teor de estabilizador que o ensaio de UCS e também está se tornando cada vez mais importante como medida de durabilidade de longo prazo. Conforme descrito na Seção 4.2.5, as pesquisas recentes demonstraram que o valor mínimo de ITS de 250 kPa é necessário para a resistência às forças destrutivas geradas pela carbonatação.

Tempo de processamento. A mistura, a pavimentação, a compactação e o acabamento devem ser realizados o mais rapidamente possível. O tempo limite de 4 horas é normalmente especificado com o tratamento com cimento, medido do momento em que o cimento entrar em contato com o material e a umidade, até o momento da conclusão da compactação. Esse limite pode ser generoso se existir potencial de um ganho rápido de resistência (ver Seção 4.2.2).

É fortemente recomendado que o retardamento permissível entre a mistura e compactação seja verificado pela análise da taxa de ganho de resistência em relação ao tempo de retardamento do material a ser estabilizado mediante a simulação de condições de campo (principalmente a temperatura).



O exemplo do gráfico mostra que um tempo de 2,5 horas é permissível para alcançar a resistência requisitada. É importante minimizar esse tempo. Com o planejamento adequado, esse período pode ser reduzido a menos de uma hora com o uso de equipamentos modernos de reciclagem e compactação.

Densidade. A compactação deve sempre ter como objetivo alcançar a máxima densidade possível mediante as condições prevalecentes no local (também chamada de "densidade de recusa"). A densidade mínima é normalmente especificada em percentual da densidade modificada AASHTO, normalmente entre 97% e 100% para bases tratadas com cimento. Um gradiente de densidade às vezes é permitido pela especificação de uma densidade "média". Isso significa que a densidade na parte superior da camada pode ser maior que na parte inferior. Conforme a especificação, é normal também incluir um desvio máximo de 2% de densidade medida na espessura do terço inferior da camada. Assim, se a densidade média especificada for 100%, a densidade na parte inferior da camada deverá ser superior a 98%.

Observação:

- O tempo disponível para o trabalho no laboratório deverá simular as condições de campo.

4.3 Estabilização com betume

Grandes avanços foram feitos nos últimos anos em relação à pesquisa de materiais estabilizados com betume e ao entendimento de seus principais parâmetros de desempenho. A Segunda Edição da Diretriz Técnica TG2 (2009) captura a essência desses avanços, incorporando as últimas abordagens de projetos de mistura e pavimentos com materiais estabilizados com betume. Esta seção resume as principais características desses desenvolvimentos.

4.3.1 Visão geral

O betume é um ligante versátil usado em camadas de pavimento de várias formas. Entretanto, uma vez que o betume é um líquido altamente viscoso e não trabalhável a temperaturas ambientes, a viscosidade deve ser primeiro reduzida para alcançar sua trabalhabilidade. Em termos gerais, existem três maneiras de se realizar isso:

- aplicação de calor (aumentando a temperatura do betume e do agregado);
- emulsão em água para formação da emulsão betuminosa; ou
- criação da espuma de asfalto em estado temporário de baixa viscosidade.

Este capítulo se concentra no uso da emulsão betuminosa e da espuma de asfalto, que são os dois únicos agentes estabilizadores betuminosos viáveis. Conforme descrito no Capítulo 6, embora a emulsão betuminosa possa ser usada como um agende rejuvenescedor em misturas com 100% de RAP, esta seção se concentrará apenas na estabilização.

A tabela a seguir compara o processo de tratamento de mistura asfáltica a quente com os dois meios de estabilização de um material com betume: emulsão BSM (material estabilizado com emulsão betuminosa) e espuma BSM (material estabilizado com espuma de asfalto).

Comparação entre diferentes tipos de tratamento de betume			
Fator	Processo de estabilização		Mistura de asfalto a quente (HMA)
	Emulsão BSM	Espuma BSM	
Tipos de agregados aplicáveis	– Rocha britada – Cascalho natural – RAP estabilizado (Mistura a frio – Capítulo 6)	– Rocha britada – Cascalho natural – RAP estabilizado – Marginal (areias)	– Rocha triturada – 0% a 50% RAP
Temperatura de mistura do betume	20° C a 70° C	160° C a 180° C (antes de espumar)	140° C a 180° C
Temperatura dos agregados durante a mistura	Ambiente (> 10° C)	Ambiente (> 15° C)	Somente quente (140° C a 200° C)
Teor de umidade durante a mistura	OMC mais 1% menos adição de emulsão	"Fluffpoint" 70% a 90% de OMC	Seco
Tipo de cobertura de agregados	Cobertura de partículas mais finas (e algumas partículas mais grossas). Coesão aumentada do betume / argamassa de finos	Cobertura com somente as partículas mais finas. Coesão aumentada do betume / argamassa de finos	Cobertura de todas as partículas de agregados com espessura de película controlada
Temperatura de construção e compactação	Ambiente (> 5° C)	Ambiente (> 10° C)	140° C a 160° C
Vácuos de ar	10% a 15%	10% a 15%	3% a 7%
Taxa de ganho inicial da resistência	Lento (perda de umidade)	Médio (perda de umidade)	Rápido (esfriamento)
Modificação do betume	Sim	Não. (Modificadores são geralmente antiespumantes)	Sim
Parâmetros importantes do betume	– Tipo de emulsão (aniônica, catiônica) – Betume residual – Tempo de quebra	– Propriedades da formação de espuma • Índice de expansão • Meia vida	– Penetração – Ponto de abrandamento – Viscosidade

O tipo de material produzido pelo tratamento com emulsão de betume ou espuma de asfalto é similar. Isso permitiu desenvolver uma abordagem comum para ambos os tipos de tratamento. Contudo, existem algumas nuances especialmente relacionadas ao teor de umidade / teor de fluído, que estão destacadas nas seguintes seções.

Embora os BSMs possam parecer ser “materiais desafiadores” devido aos diferentes números e tipos de ingredientes possíveis, esses são materiais estabilizados , não derivados de HMA. De forma similar ao projeto de estabilização de cimento, cada componente na mistura necessita ser otimizado para formular um produto composto para uma finalidade ou aplicação específica. Estes componentes incluem o material (agregado) a ser tratado, água, betume e filler ativo, cada um com a sua própria variabilidade, disponibilidade e custo. Para produzir um BSM com a qualidade e consistência necessárias para cumprir com a função pretendida, procedimentos seguros devem ser seguidos, que ajudam a identificar a formulação, mistura e produção ideais. Este processo é o procedimento de projeto da mistura.

A formulação de um BSM exige a avaliação das características volumétricas / de compactação, bem como as propriedades de engenharia / durabilidade. Como com todos os materiais estabilizados , o desempenho do produto tratado é amplamente ditado pela qualidade do material original e sua adequação ao tratamento com o agente estabilizante selecionado. Portanto, o procedimento do projeto da mistura visa a determinar o potencial do material em termos de desempenho estrutural (resistência à deformação permanente) e durabilidade (resistência à umidade e deterioração). Ao mesmo tempo, considerações econômicas continuam muito importantes na seleção de BSMs. Como o betume contribui significativamente para o custo de um BSM, a necessidade de uma otimização efetiva da quantidade de betume adicionada à mistura é de fundamental importância.

4.3.2 Mecanismos de Deterioração do BSM

Condições específicas do projeto (por exemplo, materiais disponíveis, agentes estabilizantes, clima, tráfego, camadas de sustentação, técnicas de construção, etc.) desempenham, todas elas, um papel no desempenho do material e o seu modo de deterioração. Os BSMs devem ser corretamente selecionados para as condições específicas do projeto. Ao trocar as proporções do material original, misturar agregados, betume e filler ativo, é possível criar uma mistura de BSM que atende a características comportamentais específicas.

Existem dois mecanismos fundamentais de falhas do BSMs que devem ser considerados:

- **Deformação Permanente.** É o acúmulo da deformação por cisalhamento (tensão plástica) resultante de carregamentos repetidos, e depende das propriedades de cisalhamento do material e da densificação alcançada. A resistência à deformação permanente (formação de sulcos) é aumentada por:
  - Resistência aumentada do material (agregado), angularidade, forma, dureza e aspereza;
  - Tamanho máximo de aumento da partícula;
  - Compactação melhorada (densidade do campo);
  - Teor de umidade reduzido (cura);
  - Adição de uma quantidade limitada de betume, normalmente menos de 3,0%. Teores mais altos de betume estimulam a instabilidade devido ao efeito lubrificante do betume excessivo e a consequente redução do ângulo de fricção interna; e
  - Adição de filler ativo, limitada a um máximo de 1%. Taxas mais elevadas de aplicação de filler ativo aumentam a fragilidade, o que estimula o encolhimento e as rachaduras associadas ao tráfego.

- **Suscetibilidade à umidade.** A natureza parcialmente revestida do agregado em um BSM torna a suscetibilidade à umidade um aspecto importante. A suscetibilidade à umidade é o dano causado pela exposição de um BSM a altos teores de umidade e às pressões dos poros induzidas pelas cargas de rodas. Isso resulta na perda de aderência entre o betume e o agregado. A resistência à umidade é aumentada por:
  - Maior teor de betume, limitado pelas questões de estabilidade e implicações nos custos;
  - Adição de filler ativo (máximo de 1%);
  - Densidades mais altas do campo através de uma compactação melhorada; e
  - Estabilização de um material com um nível contínuo de regularidade.

Observação:

- O comportamento do BSM é semelhante ao de materiais granulados não ligados, mas com uma coesão muito melhorada e uma reduzida sensibilidade à umidade.

4.3.3 Principais determinantes do desempenho do BSM

O desempenho de uma camada de pavimentação construída com BSM é principalmente determinado:

- pela qualidade e consistência do material da base (juntamente com todos os materiais da mistura) que foi estabilizado;
- pela qualidade e adequação do agente estabilizante do betume e do filler ativo aplicado;
- pela dosagem do agente estabilizante do betume / filler ativo e pela eficiência da mistura;
- pela densidade obtida em campo pela aplicação do esforço de compactação apropriado; e
- pela espessura e uniformidade da camada construída.

Além disso, as principais características que permanecem abaixo do horizonte de reciclagem possuem um efeito significativo sobre a camada de BSM, tanto nas características conforme construídas (especialmente a densidade) como no desempenho como um todo do pavimento:

- A qualidade e uniformidade das camadas de sustentação subjacentes (composição do pavimento);
- As condições climáticas prevalecentes (quente / frio, úmido / seco); e
- A efetividade das disposições de drenagem que influenciarão o equilíbrio do teor de umidade de todos os materiais do pavimento, incluindo BSM.

Além disso, camadas adicionais colocadas no topo da nova camada de BSM fornecem proteção do meio ambiente e de tensões induzidas pelo tráfego. Em última análise, conforme explicado no Capítulo 2, os pavimentos são projetados para acomodar níveis específicos de carga de tráfego. Apesar de uma camada de BSM ser somente um dos diversos componentes que compõem a estrutura do pavimento como um todo, cada característica que influencia o desempenho da camada de BSM necessita ser entendida para garantir um projeto apropriado

4.3.4 Material a ser estabilizado com betume

A qualidade e composição do material reciclado de um pavimento existente podem variar consideravelmente. Tais variações se devem ao(à):

- Estrutura do pavimento existente (materiais na várias camadas e sua espessura);
- Variabilidade da construção (qualidade e espessura do material);
- Profundidade da reciclagem (camadas adicionais podem ser encontradas no horizonte de reciclagem conforme o aumento da profundidade);
- Idade do pavimento (particularmente para materiais tratados previamente e materiais sujeitos à ação do clima);
- Grau de remendos e reparos do pavimento existente; e
- Espessura e natureza de materiais de revestimento antigos (por exemplo, asfalto e/ou vedações).

O material reciclado deve ser bem nivelado e cumprir com os critérios indicados abaixo.

Em alguns projetos, o nivelamento necessário pode ser obtido incorporando uma porção da camada subjacente ao material reciclado composto. Contudo, deve-se tomar cuidado ao incluir uma camada subjacente composta por material aderente. É preferível incorporar material importado (normalmente um produto triturado) espalhando-o previamente como uma camada na superfície antes de reciclar.

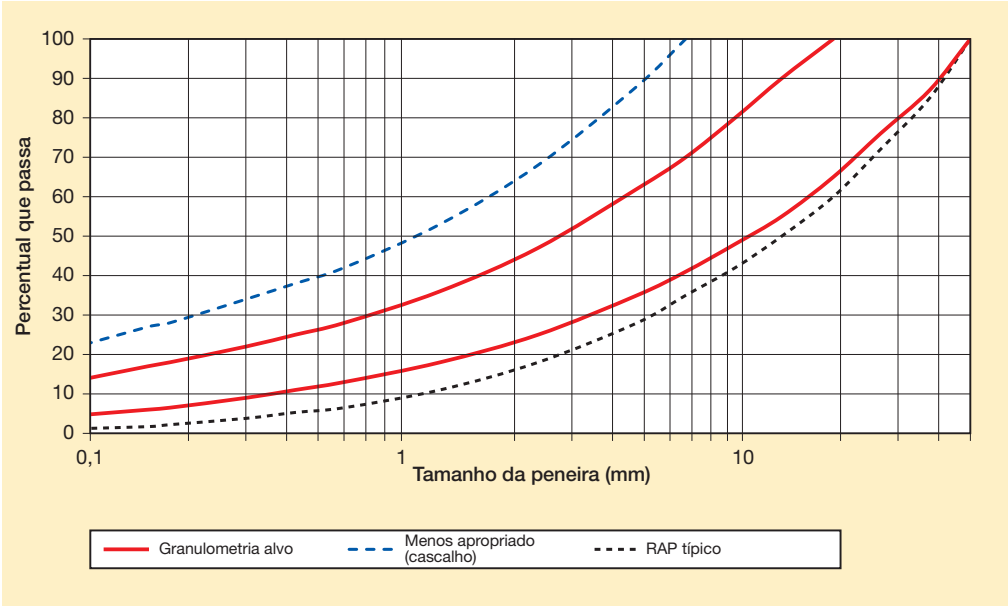
Além disso, o tamanho máximo das partículas e a quantidade de material grosso desempenha um papel importante na obtenção de densidade suficiente no campo. O tamanho máximo das partículas deve se limitar a 1/3 da espessura da camada (isto é, 50 mm para uma camada de 150 mm de espessura) e, como diretriz geral, a quantidade de material retido na peneira de 50 mm não deverá ultrapassar 10 %.

- **Material RAP.** Alguns projetos encontram uma alta proporção de material RAP no horizonte da reciclagem (> 90% do material recuperado). Em tais casos, a influência de betume antigo no RAP deve ser avaliada cuidadosamente, especialmente em climas quentes onde uma carga de tráfego pesada é esperada. . Em particular, os seguintes aspectos necessitam de atenção:
  - Região climática. Em climas quentes, as propriedades de cisalhamento da mistura devem ser determinadas a partir dos testes triaxiais realizados sob temperaturas representativas;
  - Cargas reais do eixo. Quando uma camada de BSM for destinada ao uso em uma área onde existe um controle limitado da massa do eixo, tensões mais elevadas das sobrecargas podem causar uma aceleração das deformações. Isso deve ser considerado quando se analisam as propriedades de cisalhamento.
  - A composição do material RAP. Em regiões quentes com controle limitado da massa do eixo, o RAP deve sempre ser modificado misturando-o com 15% a 25% de pó da britadeira. Isso fornecerá um esqueleto de areia angular para melhorar a resistência ao cisalhamento da mistura.

O uso de 100% material RAP nos BSMs é abordado de forma detalhada no Capítulo 6.

Duas principais características do material de base (pré-estabilizado) são utilizadas como indicadores para determinar se a estabilização do betume será efetiva: a curva granulométrica e o índice de plasticidade (PI). Apesar de um valor de CBR poder ser estimado para o material utilizando-se estas duas características, é aconselhável executar o teste de CBR imerso de 4 dias quando a qualidade do material for considerada "marginal" para a aplicação pretendida.

- **Granulometria.** As análises de peneiramento realizadas em amostras representativas do material a ser estabilizado com betume fornecem uma boa indicação da adequação para tal tratamento. O seguinte gráfico e tabela mostram a classificação granulométrica recomendada para o material tratado com espuma de asfalto ou emulsão betuminosa.



Curvas granulométricas alvo para a estabilização do betume

Envoltórios granulométricos recomendados para a estabilização do betume								
Tamanho da peneira (mm)	Tratamento com Espuma de asfalto				Tratamento com Emulsão Betuminosa			
	Percentual passando em cada tamanho de peneira (%)				Percentual passando em cada tamanho de peneira (%)			
	Granulometria recomendada		Menos apropriado (cascalho)	Granulo-metria típica do RAP	Granulometria recomendada		Menos apropriado (cascalho)	Granulo-metria típica do RAP
	Graúda	Fina				Fina		
50	100	100	100	100	100	100	100	100
37,5	87	100	100	85	87	100	100	85
26,5	76	100	100	72	76	100	100	72
19	65	100	100	60	65	100	100	60
13,2	55	90	100	50	55	90	100	50
9,5	48	80	100	42	48	80	100	42
6,7	41	70	100	35	41	70	100	35
4,75	35	62	88	28	35	62	88	28
2,36	25	47	68	18	25	47	68	18
1,18	18	36	53	11	18	36	53	10
,6	13	28	42	7	12	27	42	6
0,425	11	25	38	5	10	24	38	4
0,3	9	22	34	4	8	21	34	3
0,15	6	17	27	2	3	16	27	1
0,075	4	12	20	1	2	10	20	0

Observação. As análises de peneiras são sempre realizadas utilizando o método de teste de finos lavados.

A natureza da dispersão de betume é diferente para a espuma de asfalto e para a emulsão betuminosa e é razão para pequenas diferenças entre as duas classificações granulométrica recomendadas (limitadas a frações menores de 2,36 mm).

Espuma de asfalto. A menos que a amostra seja composta principalmente de material RAP, o tratamento da espuma de asfalto baseia-se nas partículas de poeira (<0,075 mm) para fornecer uma home para os fragmentos produzidos quando as bolhas de betume estouram. Assim sendo, a exigência mínima é que 4% do material deve passar através da peneira de 0,075 mm. Se houver partículas insuficientes de poeira para dispersar o betume adicionado, fragmentos individuais de betume tenderão a aderir uma à outra, formando "borbulhas" ricas em betume, conhecidas como "stringers". Tais stringers são efetivamente betume desperdiçado e são realmente prejudiciais à mistura; eles tem um efeito negativo sobre o ângulo da fricção interna sem ter uma influência positiva correspondente sobre a coesão do material.

Conforme explicado no Capítulo 6, partículas de todos os tamanhos em um material RAP foram previamente revestidas com betume e este betume antigo parece oferecer uma home aos fragmentos de betume. A exigência mínima de poeira pode então ser reduzida enquanto a quantidade de RAP na mistura aumenta. (O tratamento superficial com pedriscos reciclados tem o mesmo efeito na mistura que o RAP.)

Espuma BSM

Os fragmentos dispersos de betume na espuma de BSM não revestem as partículas maiores. A resina (finos, betume e água) "soldam por pontos" as frações de agregado mais grossas com a espuma de BSM. Normalmente são necessários 4% dos finos para obter uma mistura satisfatória (exceto se 100% do material RAP for tratado - vide Capítulo 6).

Emulsão BSM

A emulsão betuminosa reveste algumas partículas grossas, não somente os finos.
Um teor mínimo de finos de 2% é suficiente.

Emulsão betuminosa. Misturar um material com emulsão betuminosa é essencialmente um processo molhado. Contudo, a carga sobre gotículas de betume emulsionado tenderão a ver uma atração seletiva para aquelas partículas com concentrações mais altas de cargas opostas (as frações mais finas).

Mistura. A curva granulométrica para o material que deve ser estabilizado com betume deve sempre ser colocada em um gráfico que inclua a granulometria alvo (retirada da tabela acima). A tabela destacará todas as deficiências e sugerirá a necessidade para a mistura, bem como o tipo / tamanho do material da mistura. Material com uma curva granulométrica fora da faixa alvo pode normalmente ser estabilizada com sucesso sem misturar, desde que as seguintes condições sejam atendidas:

- Material mais fino. O índice de plasticidade (PI) é inferior a 10.
- Material mais grosso. O material é principalmente composto de RAP ou de material de tratamento de superfície reciclado com pedriscos.

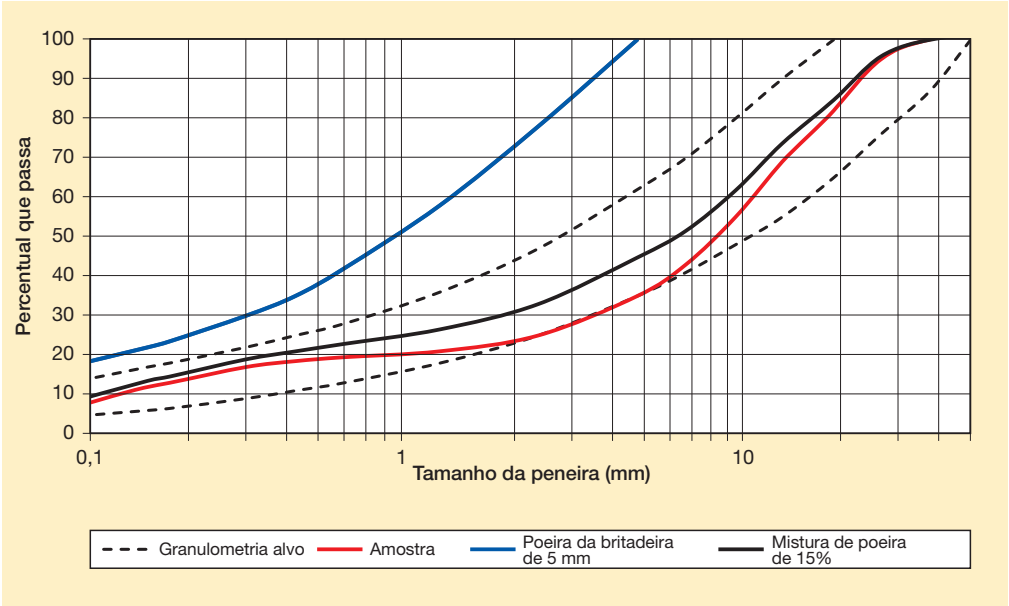
Deve-se avaliar que materiais que estão fora da classificação granulométrica alvo têm limitações e, consequentemente somente devem ser utilizados quando as alternativas forem muito limitadas. Quanto mais fino o material, mais alta a demanda por betume, enquanto materiais mais graúdos tendem à segregação e podem ser extremamente difíceis de trabalhar. A mistura frequentemente oferece uma solução técnica e, ao mesmo tempo, reduz os custos totais.

Observação:

- Sob nenhuma circunstância o filler ativo deve ser utilizado como um material na composição. Somente materiais inertes (por exemplo, poeira da britadeira) devem ser utilizados na mistura. A quantidade máxima de filler ativo adicionada a um BSM é de 1,0%.
- Uma deficiência nos finos nunca deve ser corrigida aumentando-se o filler ativo em > 1%.

Como materiais de betume estabilizado dependem da estrutura da areia para o seu desempenho, a parcela do terreno entre 0,075 mm e 2,0 mm é de importância fundamental. Todos os tamanhos de peneiras disponíveis nesta faixa para testar asfalto e solos são utilizados na análise da peneira para obter o máximo de informações sobre esta porção inferior da curva da granulometria e a curva devem sempre ser colocadas em um gráfico para determinar se a curva é contínua ou "destacada" (isto é, com intervalos). A mistura é aconselhável onde houver um destaque marcado na porção de 0,075 mm a 2,0 mm da curva, conforme mostrado no exemplo oposto.

Neste exemplo, misturar o material com 15% a menos de poeira da britadeira de 5 mm elimina grandemente a projeção na curva abaixo de 2 mm. Isso melhorará a resistência total do material (estrutura da areia) e permitirá alcançar um nível mais alto de densidade, o que reduzirá a suscetibilidade à umidade, bem como se somará à resistência alcançada no campo.



Exemplos: Mistura para corrigir uma granulometria imprópria.

Alternativamente, ao selecionar os vários materiais componentes em um exercício de mistura (por exemplo, ao utilizar um KMA 220 para a mistura na usina), a seguinte equação pode ser útil para determinar as proporções necessárias para a mistura. Isto permite obter a melhor compactação das partículas e vazios mínimos (após a compactação) calculando-se a quantidade necessária para cada tamanho individual de partícula.

$$P = \left[\frac{d}{D}\right]^{n} \times 100$$

Onde
- d = tamanho de peneira selecionado (mm)
- P = percentagem por massa que passa em uma peneira de tamanho d (%)
- D = tamanho máximo da partícula (mm)
- n = o coeficiente granulométrico depende das características de enchimento da partícula (um valor de 0,45 é recomendado).

- **Plasticidade.** PA plasticidade em um material é atribuída à presença de partículas de argila aderente na fração de finos. Seguindo-se os procedimentos padrão de teste de laboratório, o Índice de Plasticidade (PI) de um material é determinado com base na fração que passa pela peneira de 0,425 mm e é um principal indicador da suscetibilidade à umidade do material. Quanto mais alto o valor de PI, maior a quantidade de argila no material. Devido à forma e tamanho de partículas individuais, a argila tem uma capacidade de reter níveis relativamente altos de umidade. Em tal estado de umidade, a argila é altamente aderente, fazendo com que as partículas se liguem em "blocos". Reciclar um material com PI elevado não necessariamente quebrará estes pedaços e eles permanecerão na nova camada como pontos fracos localizados que retêm a sua natureza suscetível à umidade.

Além disso, uma estabilização de espuma de asfalto depende de a fração de finos dispersarem o betume. Se os finos incluem uma quantidade significativa de argila, eles não estarão disponíveis para isso, porque estarão entrelaçados nos pedaços. As classificações obtidas de testes padrão podem mostrar que existe quantidade suficiente de finos presente em um material, mas a classificação sempre necessita ser vista à luz do valor de PI; se o PI for superior a 10, os finos provavelmente serão "despedaçados" e, consequentemente, incapazes de atuar como um agente dispersante de betume.

Como regra geral, se os resultados do teste demonstram que o PI do material é superior a 10, então deve ser realizado o tratamento prévio com cal hidratada. Tal tratamento modifica o material separando as partículas de argila, eliminando assim a plasticidade.

Durabilidade. A durabilidade depende principalmente das propriedades do material pré-estabilizado . Quando um "material marginal" de qualidade inferior tiver que ser estabilizado com betume, é aconselhável verificar a suscetibilidade do material não tratado às mudanças de umidade e climáticas. Como a dispersão de betume em um BSM é seletiva, a maioria das frações mais grossas não será revestida com betume e permanecerá desprotegida na mistura. Portanto, é aconselhável determinar a suscetibilidade às mudanças de umidade e climáticas rápidas utilizando um dos muitos diferentes métodos para testar a durabilidade de um material.

Temperatura do material. No momento da mistura com um agente estabilizador de betume, a temperatura do material deve estar suficientemente alta, pois ela desempenha um papel importante na determinação da qualidade obtida da mistura.

- **Emulsão BSM**
  Tipicamente, materiais com uma temperatura de 10º C ou superior podem ser tratados com emulsão de betume, sem comprometer a distribuição de betume na mistura.

- **Espuma BSM**
  A temperatura do material tem uma influência significativa sobre o grau de dispersão e as propriedades da mistura. Temperaturas mais elevadas do material aumentam o tamanho da partícula que pode ser revestida, enquanto temperaturas baixas podem resultar em pouca ou nenhuma dispersão do betume. As medições da temperatura do material são, portanto, essenciais antes de iniciar a produção em laboratório ou em campo.

Não se deve tentar misturar com temperaturas dos materiais inferiores a 10º C. Quando a temperatura do material variar entre 10 e 15°C, as misturas somente devem ser produzidas com espuma de asfalto de qualidade superior (especialmente a meia vida). Quando tais condições forem esperadas, a qualidade da mistura deve ser verificada no laboratório, na temperatura prevista para a mistura, antes de iniciar a construção.

4.3.5 Agentes estabilizadores do betume

Betume com grau de penetração é utilizado para produzir tanto a espuma de asfalto e a emulsão betuminosa utilizada como agente estabilizador para manufaturar BSMs. Os tipos de betume e os requisitos específicos do betume estão descritos abaixo.

Emulsão betuminosa.

Os betumes de base com valores baixos de penetração entre 50 e 100 são geralmente selecionados para a produção da emulsão betuminosa, apesar de um betume mais macio e mais duro tenham sido utilizados com sucesso. A seleção da classe ou da categoria correta da emulsão betuminosa para cada aplicação é essencial, conforme indicado na tabela abaixo.

Emulsões catiônicas estáveis de betume lentamente ajustadas são utilizadas em todo o mundo quase exclusivamente para BSMs, pois essas geralmente trabalham bem com materiais densos, independentemente da rocha original, bem como com materiais com alto teor de finos. Estas emulsões betuminosas possuem tempos longos de manuseio, para garantir uma boa dispersão e são formuladas para uma maior estabilidade de mistura. (A emulsão aniônica de grau estável é utilizada em alguns climas quentes e secos.)

Taxa de quebra. Recentemente ocorreram muitos desenvolvimentos na tecnologia de emulsão betuminosa para melhorar a estabilidade sem prolongar o tempo de quebra. Estas emulsões são normalmente mais lentas do que os produtos padrão, e devem ser utilizadas em projetos onde a camada tratada puder ser curada por um período antes de abrir ao tráfego. Durante a fase de projeto da mistura, e no local antes do início da aplicação total, a taxa de quebra deve ser testada com as amostras representativas do material, do filler ativo e água, sob temperaturas realistas.

Compatibilidade da emulsão betuminosa e do material original. A seleção do tipo de emulsão betuminosa é influenciada pelo tipo de material a ser tratado. Certos tipos de material não são apropriados para tratamento com emulsões betuminosas aniônicas. Estas são as rochas ácidas com teores de sílica superiores a 65% e teores alcalinos abaixo de 35%, e incluem quartzito, granito, riólito, arenito, sienito e felsites. O tratamento de tais materiais exige uma emulsão betuminosa catiônica, conforme indicado na tabela ao lado.

Os fabricantes normalmente recomendam que a emulsão betuminosa não diluída seja aquecida entre 50 e 60° C para evitar uma quebra prematura devido ao aumento na pressão e na ação de cisalhamento, enquanto se bombeia e injeta através da barra espargidora na recicladora.

Classes de emulsão betuminosa		
Tipo de emulsão betuminosa	**Aniônica**	**Catiônica**
Tipo de emulsificador	Ácido graxo ou ácidos de resina	Amina
Carga da emulsão betuminosa	Negativa	Positiva
pH	Alto (alcalino)	Baixo (ácido)
Graus	Mistura estável (ajustada em lenta) para reciclagem / estabilização	

Compatibilidade entre o tipo de emulsão betuminosa / tipo de agregado			
Tipo de emulsão	**Tipo de agregado (Rocha)**	**Tendências**	
		Taxa de quebra	**Adesão**
Aniônica	Ácida	Lenta	Ruim
Aniônica	Alcalina	Média	Boa
Catiônica	Ácida	Rápida	Excelente
Catiônica	Alcalina	Rápida	Boa

Espuma de asfalto

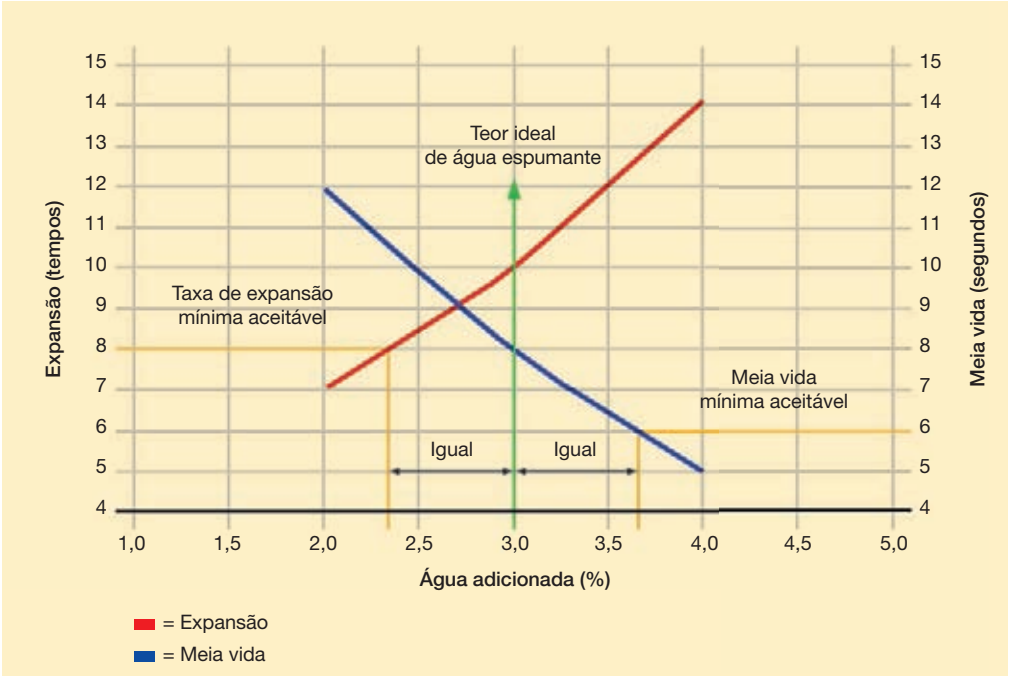
Classes de betume com valores de penetração entre 60 e 200 são geralmente selecionadas para espuma de BSM, embora betume mais rígido tenha sido utilizado com sucesso no passado, sem comprometer a qualidade da mistura (o betume mais rígido normalmente é evitado devido à má qualidade da espuma, o que resulta em uma dispersão ruim do betume na mistura).
O valor da penetração, por si só, não qualifica o betume para uso em uma espuma de BSM. As características da capacidade de produzir espuma de cada tipo de betume necessitam ser testadas. Duas propriedades formam a base da adequação do betume ao uso, a saber, o Coeficiente de Expansão (ER) e a Meia Vida ($\tau_{1/2}$):

- O coeficiente de expansão é uma medida da viscosidade da espuma e determina como o betume se dispersará na mistura. É calculado como a razão do volume máximo de espuma em relação ao volume original do betume.
- A meia vida é uma medida de estabilidade da espuma e fornece uma indicação da taxa de colapso da espuma. É calculada como o tempo em segundos que a espuma leva para colapsar até a metade do seu volume máximo.

Um dos fatores dominantes que influenciam as características da espuma é a quantidade de águam injetada na câmara de expansão para criar a espuma, a água espumante. Aumentar a taxa de aplicação da água criará uma maior expansão (ER mais elevado), mas conduz a uma subsidência ou deterioração mais rápida, a uma meia vida mais curta ($\tau_{1/2}$), conforme ilustrado no gráfico ao lado.

A taxa de aplicação da água e a temperatura do betume são os fatores mais importantes que influenciam a qualidade da espuma. Uma temperatura mais alta do betume normalmente cria uma espuma melhor. Uma análise da sensibilidade em laboratório é recomendada para identificar a temperatura alvo do betume para a formação de espuma. (Assim como com a produção de HMA, os limites da temperatura devem ser implementados para evitar danos ao betume.)

A variabilidade das características da espuma medida em um laboratório, tanto em termos de repetitividade e reprodutibilidade, é significativa. Para obter um nível aceitável de confiabilidade estatística, são recomendados, no mínimo, três testes para cada conjunto de condições. Além disso, a potencial variabilidade na composição do betume de uma mesma fonte exige a verificação das características da espuma de cada carga do caminhão tanque de betume.



Determinação do teor ideal de água espumante

Características da espuma de asfalto (Limites mínimos)		
Temperatura do agregado	10° C a 15° C	Superior a 15 ° C
Taxa de expansão, ER (tempos)	10	8
Meia vida, $\tau_{1/2}$ (segundos)	8	6

4.3.6 Filler ativo

Para os fins deste manual, o termo filler ativo é utilizado para definir os fillers que alteram quimicamente as propriedades da mistura. Os tipos de filler ativo utilizados com BSMs são: cimento (vários tipos, mas não cimentos com endurecimento rápido), cal e cinzas, mas exclui fillers naturais tais como rocha pulverizada. Além disso, neste manual, o termo "cal" sempre se refere à cal hidratada.

O objetivo da incorporação de filler ativo no BSM é:

- **Melhorar a aderência** do betume com o agregado.
- **Melhorar a dispersão** do betume na mistura.
- **Modificar a plasticidade** dos materiais naturais (reduzir PI).
- **Aumentar a dureza** da mistura e a taxa do ganho de resistência.

Emulsão BSM

- Controlar o tempo de quebra.
- Melhorar a funcionalidade (em alguns casos).

Espuma BSM

- Para auxiliar a dispersão das lascas de betume.

Observação:

- A adição máxima permitida de cimento no BSMs é de 1%.

Vários tipos de filler ativo podem ser utilizados, em separado ou combinados. O tipo selecionado dependerá da disponibilidade, custo e eficiência com os materiais reais dos componentes. Pesquisas demonstraram ser quase impossível prever qual filler ativo demonstrará ser o mais eficiente, sem experimentação durante o projeto da mistura. (Testar amostras com 100 mm de diâmetro com relação à Resistência à Tensão Indireta é o guia mais útil para a escolha do filler ativo, conforme descrito no Apêndice 1)

Quando cimento é utilizado, a taxa de aplicação deve ser limitada a um máximo de 1% por massa de material seco. Quando se utiliza a cal hidratada, a taxa de aplicação pode ser aumentada para 1,5% (ou mais), se for necessário que a cal modifique a plasticidade. Contudo, deve-se observar que com as taxas de aplicação acima, o aumento na rigidez da mistura é significativamente comprometido pela perda da flexibilidade do material e o benefício do betume raramente é percebido.

Quando fillers ativos são aplicados, o retardo de tempo entre a mistura do filler ativo com o material e a aplicação da espuma de asfalto ou emulsão betuminosa deve ser reduzido a um mínimo (tanto no laboratório como em campo). A reação do filler ativo inicia imediatamente após o contato com o material úmido, promovendo a adesão entre as partículas de finos. Quanto mais tempo o retardo entre a pré-mistura com filler ativo e a aplicação do betume, mais baixo o percentual de finos disponíveis para dispersão do betume na mistura de BSM.

Quando forem encontrados materiais com valores de PI demasiadamente altos, os mesmos podem ser tratados com cal hidratada para modificar a plasticidade, tornando-os aceitáveis para tratamento com espuma de asfalto ou emulsão betuminosa. O pré-tratamento com cal deve proporcionar tempo suficiente para que a modificação ocorra antes do tratamento do betume (normalmente, 4 horas são suficientes).

4.3.7 Qualidade da água

A qualidade da água utilizada para criar a espuma de asfalto e para diluir uma emulsão betuminosa é muito importante. Os requisitos padrão da qualidade da água para o concreto e outros materiais rodoviários devem ser observados.

Emulsão BSM

Os níveis de pH da água devem ser verificados, assim como a compatibilidade da emulsão betuminosa com a água.

Observação:

- Ao diluir emulsão betuminosa, sempre adicione água à emulsão betuminosa para evitar uma quebra prematura.

Espuma BSM

Embora uma espuma aceitável possa ser obtida com água contendo impurezas, tal prática deve ser evitada. Frequentemente, as impurezas resultam em carepas nas paredes dos tubos de alimentação, e estas eventualmente se desalojam e bloqueiam os jatos de injeção de água, impedindo que o betume forme espuma.

4.3.8 Procedimento de concepção da mistura

O procedimento de concepção da mistura envolve várias etapas e de uma ou mais séries de testes, dependendo da importância da rodovia e da magnitude do tráfego do projeto. O procedimento de concepção da mistura sempre inicia pelo teste das amostras do material a ser estabilizado (testes de laboratório padrão) para determinar se as mesmas são apropriadas para o tratamento com betume e, caso contrário, o tipo de pré-tratamento ou composição necessário para torná-las apropriadas.

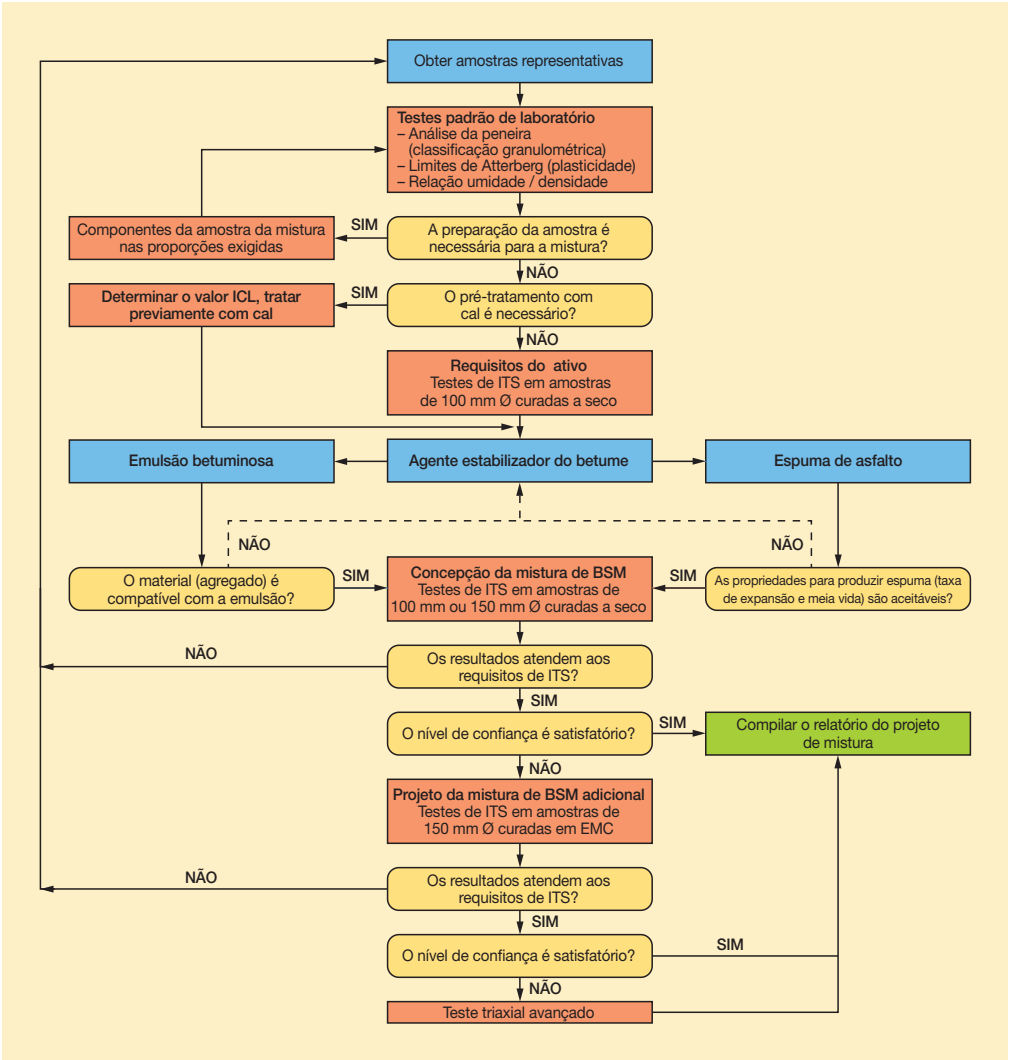
Após comprovar a adequação do material, o procedimento real de concepção do projeto inicia com uma série de testes preliminares para determinar a necessidade de adição de um filler ativo, e se o material demonstra uma preferência para cimento ou cal hidratada. Todos os testes adicionais são então realizados de acordo com estes resultados (por exemplo, se ficar demonstrado que o cimento é o filler ativo preferido, então todas as misturas incluirão 1% nominal de cimento).

A concepção da mistura é então realizada misturando-se uma série de amostras, cada uma com uma quantidade diferente de betume. Os materiais misturados são então utilizados para manufaturar diversas amostras de 100 mm ou de 150 mm de diâmetro, as quais são curadas a seco e testadas para determinar as suas respectivas resistências à tensão indireta (ITS), tanto sob condições de saturação ou não. Estes resultados fornecem um indicativo da quantidade ideal de betume que deve ser adicionada para obter um nível específico de resistência.

Projetos adicionais de mistura utilizando amostras de 150 mm de diâmetro, curadas sob condições diferentes, podem ser realizados se um nível de confiança mais elevado for necessário. O intervalo do betume adicionado a tais misturas normalmente é inferior do que aquele aplicado ao projeto inicial da mistura, permitindo assim uma avaliação mais precisa do teor ideal de betume a ser adicionado. Outros testes de sensibilidade também podem ser realizados utilizando o mesmo processo para a manufatura e cura da amostra (por exemplo, o efeito da redução da quantidade do filler ativo para 0,75%).

O Apêndice 1 inclui os procedimentos detalhados de laboratório para realizar um projeto de mistura de BSM utilizando emulsão betuminosa ou espuma de asfalto como agente estabilizante.

Quando níveis mais elevados de confiança forem exigidos (por exemplo, para o projeto de pavimentos com demanda pesada ou estratégicos, tais como pistas de decolagem em aeroportos importantes), uma série de testes triaxiais pode ser realizada em grandes amostras (diâmetro de 150 mm x 300 mm de altura) manufaturados com um teor ideal de adição de betume. As propriedades de cisalhamento determinadas a partir de tal programa de teste são alimentadas diretamente nos modelos do projeto do pavimento. Estes testes são considerados “especializados” e não são abrangidos por este manual; estão adequadamente descritos na Diretriz Técnica TG2 (2009).


Obter amostras representativas
Testes padrão de laboratório
– Análise da peneira (classificação granulométrica)
– Limites de Atterberg (plasticidade)
– Relação umidade / densidade
A preparação da amostra é necessária para a mistura?
SIM
Componentes da amostra da mistura nas proporções exigidas
NÃO
O pré-tratamento com cal é necessário?
SIM
Determinar o valor ICL, tratar previamente com cal
NÃO
Requisitos do ativo
Testes de ITS em amostras de 100 mm Ø curadas a seco
Agente estabilizador do betume
Emulsão betuminosa
Espuma de asfalto
NÃO
O material (agregado) é compatível com a emulsão?
SIM
Concepção da mistura de BSM
Testes de ITS em amostras de 100 mm ou 150 mm Ø curadas a seco
SIM
NÃO
As propriedades para produzir espuma (taxa de expansão e meia vida) são aceitáveis?
NÃO
Os resultados atendem aos requisitos de ITS?
SIM
O nível de confiança é satisfatório?
SIM
Compilar o relatório do projeto de mistura
NÃO
Projeto da mistura de BSM adicional
Testes de ITS em amostras de 150 mm Ø curadas em EMC
NÃO
Os resultados atendem aos requisitos de ITS?
SIM
O nível de confiança é satisfatório?
SIM
NÃO
Teste triaxial avançado

O procedimento do projeto completo da mistura é explicado no fluxograma acima.

4.3.9 Classificação de BSMs

Os resultados obtidos com os vários ensaios de resistência da mistura são utilizados para avaliar o desempenho esperado do BSM. Diversos sistemas diferentes de classificação foram desenvolvidos para estes materiais, bem como métodos para relacionar BSM a um material padrão (por exemplo, o método de equivalência adotado na Califórnia). Coeficientes das camadas estruturais derivados destes testes de resistência foram desenvolvidos para introdução no método de concepção do Número Estrutural AASHTO (veja Seção 4.3.12).

Até o presente, o programa de pesquisa mais abrangente sobre BSMs foi realizado na África do Sul entre 2004 e 2009. Envolvendo testes em laboratório (incluindo testes triaxiais monotônicos e de carga repetida em grandes amostras), juntamente com um exercício detalhado do desempenho no longo prazo de um pavimento (LTPP) em 23 pavimentos diferentes (incluindo diversas sessões de ensaios de HVS), este trabalho culminou com a publicação das Diretrizes Técnicas da Academia de Asfalto TG2 (2009). A metodologia do projeto emanada deste trabalho utilize os resultados dos testes de resistência (ITS e triaxial) para classificar o BSM em uma das três classes (BSM1 sendo um material de alta qualidade com excelentes propriedades de cisalhamento, enquanto um BSM3 possui baixas propriedades de cisalhamento, sendo apropriada somente para rodovias com tráfego leve). Tal classificação se enquadra diretamente no método empírico de projeto Número de Pavimento (descrito na Seção 2.6.4).

Para simplificar as coisas e focar somente os aspectos mais práticos do projeto de um pavimento, duas classes de BSMs foram adotadas:

BSM Classe 1:
Materiais com alta resistência ao cisalhamento. Estes materiais são adequados para a construção da camada de base em pavimentos com uma capacidade estrutural superior a 3 milhões de ESALs (onde a modelagem analítica é recomendada para a concepção do pavimento).

BSM Classe 2:
Materiais com moderada resistência ao cisalhamento. Estes materiais são adequados para a construção da camada de base de pavimentos com capacidade estrutural inferior a 3 milhões de ESALs, onde os métodos empíricos (métodos SN e PN) são adequados para conceber o pavimento).

A tabela a seguir resume os requisitos para classificar um BSM em uma das duas classes.

Classes de BSM recomendadas com base nos resultados do teste de ITS			
	Classe 1	**Classe 2**	**Não apropriada**
Material original: Resultado do teste do Projeto da Mistura	RAP e GCS RAP / GCS mistura RAP / GCS / cascalho	Misturas Cascalho natural Materiais marginais	Cascalho impróprio Materiais plásticos Solos
ITS_{DRY} Amostras de 100 mm e 150 mm Ø	**> 225 kPa**	125 a 225 kPa	< 125 kPa
ITS_{WET} & ITS_{SOAK} Amostras de 100 mm e 150 mm Ø	**> 100 kPa**	50 a 100 kPa	< 50 kPa
ITS_{EQUIL} Somente amostras de 150 mm Ø	**> 175 kPa**	95 a 175 kPa	< 95 kPa
Propriedades de cisalhamento implícitas			
Coesão	> 250 kPa	> 50	< 50
Ângulo da fricção interna	> 40°	> 25°	< 25°
Propriedades implícitas do material originário			
Índice de Suporte Califórnia (CBR)	> 80%	> 20%	< 20%
Índice de Plasticidade (PI):	< 10	< 15	> 15

4.3.10 Trabalhando com BSMs

Aspectos da segurança da espuma BSM
As temperaturas do betume devem ser elevadas (tipicamente >160° C) para que a reação da água produza um espumado aceitável. Com tais altas temperaturas, o betume deve ser tratado com o respeito e os procedimentos de segurança adequados estabelecidos, similares àqueles adotados para a produção de asfalto misturado a quente. Isto é bem conhecido dos fabricantes do asfalto que trabalham com betume quente diariamente, mas o empreiteiro de reciclagem que assumir um projeto com espuma de asfalto pela primeira vez, necessita garantir um treinamento apropriado aos seus funcionários. As mesmas regras de segurança adotadas e documentadas para a mistura asfáltica a quente, são aplicáveis à espuma de asfalto.

Considerações sobre os fluídos
O papel da umidade no material estabilizado é semelhante na emulsão e na espuma BSM sob muitos aspectos, mas existem algumas diferenças. Todo o conteúdo de fluídos na mistura (umidade e betume) deve ser considerado. O papel do fluído nos dois tipos de BSM é explicado na tabela abaixo.

Papel dos fluídos no BSM		
Componente	**Emulsão BSM**	**Espuma BSM**
Betume	Contribui com fluídos para a compactação	Contribuição insignificante de fluidos para a compactação
Umidade no agregado	Reduz a absorção da água de emulsão betuminosa no agregado	Separa e suspende os finos, disponibilizando-os para o betume durante a mistura
	Evita a quebra	Atua como um transportador de lascas de betume durante a mistura
	Prolonga o tempo de cura e reduz a resistência antecipada	Reduz a resistência antecipada
	Fornece facilidade de manuseio do BSM em temperaturas ambiente	
	Reduz o ângulo de fricção e lubrifica para compactação	
	Fornece vida em prateleira para a mistura	

Emulsão BSM

As modificações no teor de umidade ocorrem em duas fases distintas, a saber:
- **Quebra** é a separação do betume da fase de água com a floculação e a coalescência das gotículas de betume para produzir películas de betume em partículas individuais do material. A taxa em que as gotículas de betume se separam da fase de água é mencionada como o tempo de quebra (também conhecido como endurecimento ou tempo de endurecimento.)

O processo de quebra com emulsões aniônicas de betume é um processo mecânico (evaporação), visto que as emulsões catiônicas de betume produzem uma quebra química. Com misturas densas, mais tempo é necessário para a mistura e colocação e tempos mais lentos de quebra são necessá-

rios. Quando a emulsão betuminosa rompe, a cor muda de marrom sujo para preto. Embora isto possa ser observado a olho nu, recomenda-se utilizar uma lente de aumento.

- **A cura** é o deslocamento da água e o resultante aumento na rigidez e resistência à tensão do BSM. Isto é importante porque uma mistura deve adquirir rigidez e coesão suficientes entre as partículas antes de suportar o tráfego.

Alguns dos fatores que influenciam o processo de quebra e cura (conhecido como o **processo de "ajuste"** das emulsões betuminosas), incluem:

- **Taxa de absorção** da água pelo material. Materiais com textura áspera ou porosos reduzem o tempo de quebra e ajuste ao absorverem a água contida na emulsão betuminosa.
- **O teor de umidade** da mistura anterior à mistura influencia o tempo de quebra.
- **O teor de umidade** da mistura após a compactação influencia a taxa de cura.
- **Granulometria** do material e teor de vazios na mistura.
- **Tipo, classificação e quantidade** da emulsão betuminosa.
- **Forças mecânicas** causadas pela compactação e pelo tráfego.
- **Composição mineral do material.** A velocidade da cura pode ser afetada pelas interações físico-químicas entre a emulsão betuminosa e a superfície das partículas individuais do material.
- **Intensidade da carga elétrica** sobre as partículas de material em relação àquela da emulsão betuminosa.
- **Adição de ativo**, quantidade de cimento ou cal.
- **Temperatura** do material e do ar. Quanto mais elevada a temperatura, mais rapidamente a emulsão betuminosa quebrará e curará.

Espuma BSM

O teor de umidade do material reduz devido à evaporação e à repulsão pelo betume. Este processo é conhecido como "cura".

À medida que o teor de umidade reduz, a resistência à tensão e a rigidez do material aumentam. Isto é importante porque a camada concluída de espuma de BSM frequentemente necessita adquirir rigidez e coesão suficientes entre as partículas antes de suportar cargas pesadas.

Umidade da mistura. O teor de umidade que irá fornecer a melhor mistura de BSM é denominado como o teor ideal de umidade da mistura (OMMC). Esta é a umidade no material, e em emulsões de BSM, mais a umidade adicional na emulsão betuminosa. A OMMC varia com a graduação do material e, em particular, o tamanho da fração menor de 0,075 mm.

Emulsão BSM

Um mínimo de 1-2% de umidade é necessário no material antes da adição da emulsão betuminosa.
A água e o betume na emulsão betuminosa atuam como lubrificantes nas misturas de emulsão de BSM. O teor ideal de umidade (OMC) determinado a partir da compactação AASHTO modificada deve ser utilizado no teor total de fluídos de mistura. Isto é explicado na equação abaixo: OFC = $OMC_{MOD\ U}$ = FMC + EWC + RBC

Onde:

OFC	=	teor ideal de fluidos (%)
OMC_{MOD-U}	=	teor ideal de umidade utilizando Mod. AASHTO de compactação de material não tratado (%)
FMC	=	teor de umidade do agregado (%)
EWC	=	teor de água da emulsão betuminosa incluindo a água utilizada para diluição como um percentual de agregado seco (%)
RBC	=	teor residual de betume como percentual do agregado seco (%)

Espuma BSM

A umidade de Fluffpoint (o teor de umidade que resulta no volume máximo de agregados minerais soltos durante a agitação) deve ser utilizada como uma meta. Este valor varia de 70 a 90% do teor ideal de umidade (OMC) (determinado a partir de compactação AASHTO modificada).

O teor alvo de umidade quando se adiciona espuma de asfalto é de 75% do OMC.

Alimentação de Betume
Ao acoplar uma nova carga de agente estabilizante de betume do caminhão tanque na recicladora, algumas verificações básicas devem ser realizadas para garantir que o betume está adequado ao uso pretendido. Independentemente de o caminhão tanque conter emulsão betuminosa ou betume com grau de penetração, a temperatura do conteúdo deve ser verificada utilizando um termômetro calibrado (medidores instalados nos caminhões tanques não são confiáveis).

Emulsão BSM

- O manômetro na barra espargidora deve ser verificado para garantir que a emulsão betuminosa flua livremente e não crie uma pressão de retorno excessiva devido a um bloqueio.

Espuma BSM

- As características de produção de espuma de cada carga do caminhão tanque de betume devem ser verificadas utilizando o bocal de teste na recicladora.
- A qualidade da espuma é uma função da pressão operacional do betume. Quanto mais alta a pressão, mais o jato de betume tenderá a atomizar enquanto passa através do jato para dentro da câmara de expansão, promovendo assim a uniformidade da espuma. Se o betume tiver que entrar na câmara de expansão como um jato (e o fizer sob pressões baixas) a água somente causará impacto sobre um lado do jato, criando espuma, mas o outro lado permaneceria como betume quente sem espuma. É, portanto, imperativo ajustar a recicladora e operá-la em uma velocidade de avanço que mantenha uma pressão operacional mínima acima de 3 bars.

O betume entregue ao local pelos caminhões tanque que estão equipados com chaminés aquecidas pelo fogo é, algumas vezes, contaminado por pequenas peças de carbono, que se formam nas laterais das chaminés durante o aquecimento. Drenar as poucas últimas toneladas do caminhão tanque poderá atrair estas partículas indesejadas para dentro do sistema da recicladora e causar bloqueios. Este problema pode ser facilmente resolvido garantindo-se a eficiência do filtro na linha de entrega. Qualquer aumento incomum na pressão indicará que o filtro necessita ser limpo, um procedimento que deve, de alguma forma ser realizado regularmente (por exemplo, ao final de cada turno).

Aplicando Filler Ativo

Vide Seção 4.2.6, Uniformidade da aplicação.

Mistura

Misturar o BSM envolve a adição de todos os aditivos ao material originário e fornecer energia de agitação suficiente dentro de período de tempo relativamente curto, de maneira a alcançar uma mistura homogênea. Este processo é descrito adequadamente no Capítulo 3 para tratamento no local e na planta.

Emulsão BSM

A inclusão de emulsão betuminosa melhora tipicamente a capacidade de compactação da mistura.

Espuma BSM

A compactação promove a aderência da resina de betume às partículas graúdas.

Compactação

Atenção especial deve ser dada à compactação, pois a mesma melhora os contatos das partículas e reduz os vazios. A densidade obtida é crítica para o desempenho final da mistura.

Rolos de patins vibratórios são normalmente utilizados para compactar camadas de BSM em campo. Tais rolos transmitem energia muito alta e, portanto, para alcançar um nível específico de densidade, exige um teor ideal eficiente mais baixo de fluídos em comparação com aquele determinado em laboratório. Por esta razão, normalmente é possível compactar em campo com

um teor de umidade da mistura (relativamente baixo). (A seleção dos rolos, em termos de tipo e capacidade, é descrita no Manual de Aplicação de Reciclagem a Frio da Wirtgen.)

Assim como com materiais estabilizados com cimento, a compactação dos BSMs deve sempre visar alcançar a densidade máxima possível sob as condições prevalecentes no local (a assim denominada “densidade de recusa”). A densidade mínima é usualmente especificada como uma percentagem da densidade AASHTO modificada, normalmente entre 98% e 102% para as bases de betume estabilizadas. Algumas vezes é permitido um gradiente de densidade especificando-se uma densidade “média”. Isto significa que a densidade no topo da camada pode estar mais elevada do que no fundo. Sempre que especificado, é também normal incluir um desvio máximo de 2% para a densidade medida na espessura do terço inferior da camada.

Assim, se a densidade média especificada for 100%, então a densidade na parte inferior da camada deve ser superior a 98%.

Cura

A cura dos BSMs é o processo em que a camada misturada e compactada perde umidade através da evaporação, repulsão da carga das partículas e pelos caminhos do fluxo induzidos pela pressão dos poros.

A redução do teor de umidade conduz a um aumento na resistência à compressão e à tensão, bem como na rigidez do material.

Emulsão BSM

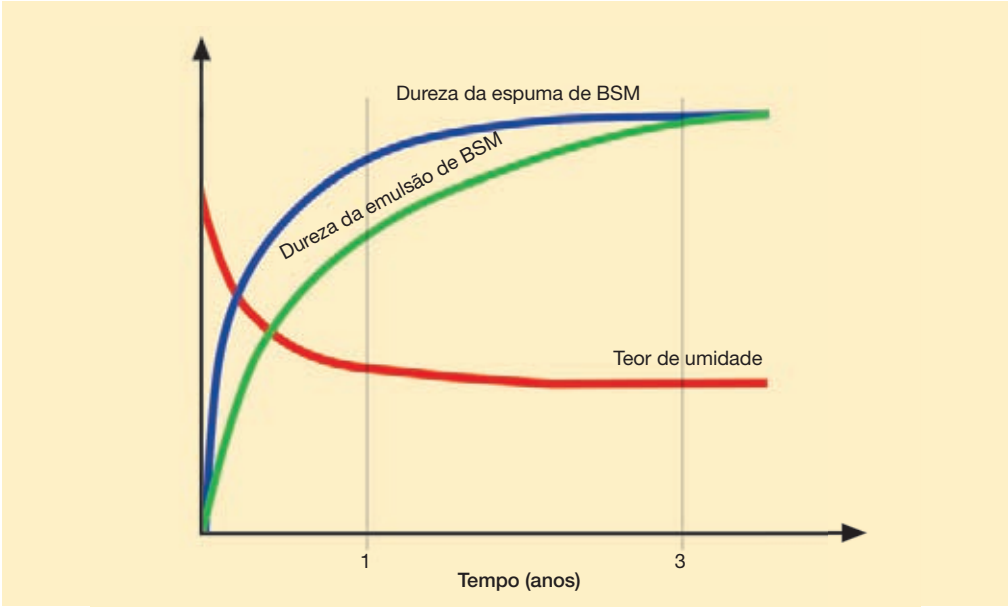
A química desempenha um papel importante na cura de emulsões de BSM. A água é um componente intrínseco das emulsões de betume. A quebra da emulsão betuminosa deve ocorrer antes da cura, em consequência da migração e perda de umidade por evaporação.

A emulsão de BSM normalmente exige tempos de cura mais longos que a espuma de BSM por causa dos teores mais altos de umidade.

Espuma de BSM

A cura ocorre em consequência da migração de água durante a compactação e continua com a repulsão da umidade pelo betume e perda por evaporação.

A taxa de perda de umidade de camadas de BSM recentemente construídas desempenha um papel significativo no desempenho da camada. É no período inicial de cargas repetidas que a maioria das deformações permanentes ocorre nas camadas de BSM. Quando uma camada de BSM tiver que ser aberta ao tráfego imediatamente após a construção, é importante manter o teor de umidade da compactação em um mínimo. Quanto mais baixo for o grau de saturação (teor de umidade) da BSM, maior a resistência à deformação permanente.



Conceito de cura e influência sobre a rigidez da mistura

As taxas de cura dependem do tipo de tratamento (emulsão BSM ou espuma de BSM). Embora a utilização de filler ativo tenha um impacto sobre a cura, a sua inclusão em um BSM não justifica aumentos do tempo de cura, pois a cimentação não é uma das propriedades desejadas desses materiais.

Embora um BSM deva ter rigidez e resistência suficientes para suportar níveis moderados de tráfego inicial, a camada deverá continuar a ganhar resistência ao longo de vários anos (isto é, melhorar a sua resistência às deformações permanentes).

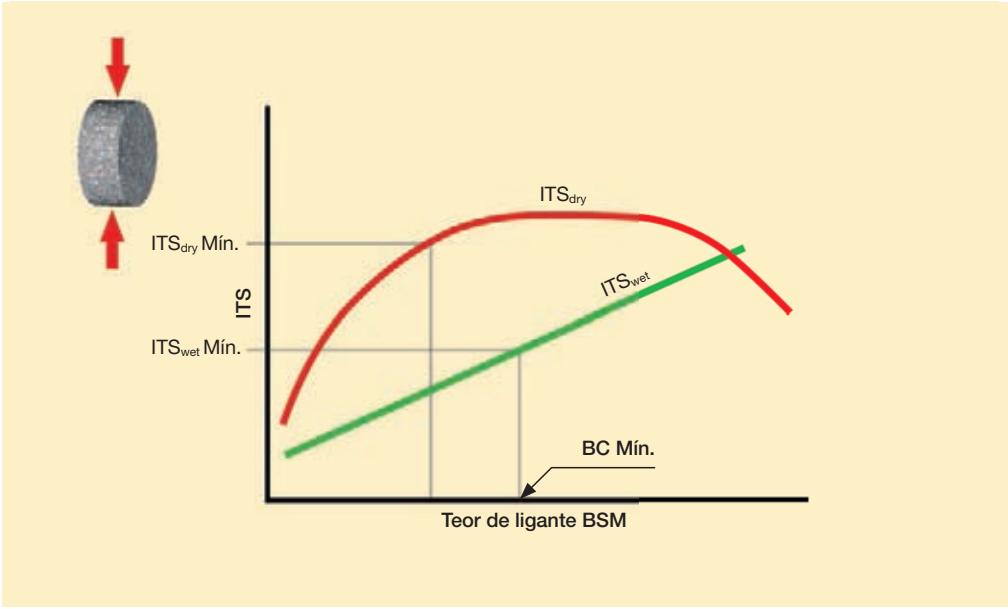
4.3.11 Testes mecânicos

Resistência à Tensão Indireta (ITS)
O teste de ITS é uma medida indireta de resistência à tensão e reflete a flexibilidade e as características de flexão do BSM. Embora este teste não produza resultados altamente repetíveis, é o método mais econômico disponível para investigar a eficiência do betume em um BSM. Além disso, um background dos dados históricos está disponível.

Amostras com 100 mm ou 150 mm de diâmetro são utilizadas para indicar o teor ideal de betume, a necessidade de um filler ativo, e, caso o filler ativo seja necessário, com que teor.

As amostras são curadas por 72 horas a 40º C para se obter uma massa constante (veja Apêndice 1). Os valores IYSDRY são determinados a partir destas amostras. Os resultados obtidos após submergir as amostras por 24 horas a 25ºC são denominados ITS_{WET}. O coeficiente de ITS_{WET} e ITS_{DRY}, expresso como um percentual, é a Resistência Tensão Retida (TSR). Um exemplo das tendências típicas dos resultados do teste de ITS é mostrado na figura abaixo, indicado como os resultados reais são analisados em comparação com uma classificação de BSM específica.

Amostras com 150 mm de diâmetro e 95 mm de altura também podem ser curadas para similar as condições de umidade em campo (vide Apêndice 1). Os resultados de ITS de amostras testadas após esta cura são denominados ITS_{EQUIL}. Os



Interpretação de ITS para o tipo e teor de betume (Nível 1)

resultados após imersão em água por 24 horas a 25º C são denominados ITS_{SOAK}.

Os limites para a interpretação de vários testes de ITS são mostrados na tabela da seção 4.3.9.

Observação: O valor de TSR é útil para identificar problemas nos materiais. Se o TSR for inferior a 50%, recomenda-se incluir filler ativo na mistura. Se tal tratamento não aumentar o valor ITSWET com uma aplicação máxima de 1% de cal ou cimento, então a natureza do material que está sendo estabilizado devem ser investigada.

- **Material granular.** Uma combinação de TSR <50% e ITS_{DRY} > 400 kPa sugere contaminação (normalmente atribuída à argila ou a materiais prejudiciais). Nesta situação, a sugestão é pré--tratar o material com cal hidratada e repetir os testes.
- 100% de material RAP. Uma combinação de TSR <50% e ITS_{DRY} > 500 kPa indica que o material tratado está parcialmente estabilizado e parcialmente asfáltico (ligado continuamente). Nesta situação, provavelmente o material exige uma mistura com poeira da britadeira para garantir que o processo de estabilização domine a mistura (vide Capítulo 6).

Além disso, testes utilizando amostras de 150 mm de diâmetro devem ser realizados para verificar os valores pertinentes de ITS_{EQUIL} para a classificação do BSM.

4.3.12 Abordagens do projeto de pavimentos para BSMs

Existem três métodos de projeto estrutural aceitos para BSMs e esses são discutidos abaixo.

Método de projeto do número estrutural
O método de projeto AASHTO (1993) que utiliza Números Estruturais está descrito no Capítulo 2, Seção 2.6.3. Este método de projeto é popular em todo o mundo principalmente por causa da sua simplicidade e por ser amigável ao usuário, sendo amplamente utilizado em projetos de todos os tipos de pavimentos.

Assim como com todas as rotinas de projetos, a confiabilidade dos resultados obtidos utilizando este método depende da exatidão dos parâmetros fornecidos. Com Números Estruturais, a informação mais importante que afeta o resultado é a seleção de um coeficiente apropriado da camada estrutural para cada camada de material. Estes coeficientes refletem as propriedades de engenharia do material in situ na camada.

A tabela abaixo inclui coeficientes de camadas estruturais para aquelas camadas construídas com a utilização de materiais convencionais.

Coeficientes típicos da camada estrutural (AASHTO)		
Tipo de material	**Característica**	**Coeficiente da camada estrutural (por polegada)**
Superfície de asfalto	Módulo elástico 2,500 a > 10,000 MPa	0,30 a 0,44
Base asfáltica	Com dimensões contínuas (6% de vazios)	0,20 a 0,38
Brita graduada	CBR > 80%	0,14
Cascalho natural, tipo 1	CBR 65 a 80%	0,12
Cascalho natural, tipo 2	CBR 40 a 65%	0,10
Solo, tipo 1	CBR 15 a 40%	0,08
Solo, tipo 2	CBR 7 a 15%	0,06
Areia sem coesão	PI = 0	0,04 a 0,05
Pedra britada tratada com cimento	1,0 < UCS < 3,0 MPa	0,17
Cascalho tratado com cimento	UCS < 1,0 MPa	0,12

Observação:

- O método de projeto AASHTO se originou na América. Coeficientes da camada estrutural são normalmente cotados “por polegada” de espessura da camada. Os vários valores atribuídos a diferentes materiais e a magnitude do coeficiente em termos “por polegada” são bem conhecidos em todo o mundo. Por conseguinte, é preferível que países que utilizam o sistema métrico retenham os coeficientes em termos “por polegada” e convertam a espessura da camada de centímetros para polegadas (1 polegada = 2, 54 cm).

Como a estabilização do betume é uma tecnologia relativamente nova, nenhum coeficiente da camada estrutura relevante está disponível para tais materiais no método AASHTO de projeto. A tabela a seguir mostra como o coeficiente da camada estrutural de um BSM pode ser estimado a partir dos testes de ITS. Além disso, este quadro pode ser utilizado como um indicador das propriedades de cisalhamento do BSM, bem como para obter uma estimativa aproximada do coeficiente da camada estrutural, com base no valor CBR do material não tratado.

Coeficientes sugeridos da camada estrutural para material estabilizado de betume (BSM)

Coeficiente da camada estrutural (por polegada)	0,18	0,23	0,28	max. 0,35
Resistência à Tensão Indireta (ITS) após a estabilização				
Amostras de 100 / 150 mm Ø				
ITS_{DRY} (kPa)	125	175	225	
ITS_{WET} & ITS_{SOAK} (kPa)	50	75	100	
Amostras de 150 mm Ø				
ITS_{EQUIL} (kPa)	95	135	175	
Propriedades de cisalhamento indicadas				
Coesão (kPa)	50	100	250	
Ângulo de fricção (°)	25	30	40	
Valor CBR do material antes da estabilização (na densidade em campo)				
(Materiais com CBR < 20% não recomendado)	20	40	80	
Taxa prevista de aplicação de betume para estabilização (% por massa)				
	2,5–4,0	2,0–3,0	1,8–2,3	

Método de projeto do número do pavimento
O método de projeto PN foi desenvolvido como parte das diretrizes TG2 (2009) para o projeto de BSMs.

O método de projeto PN é uma abordagem baseada no conhecimento (ou heurístico) e pode ser utilizado para um projeto com uma confiabilidade de 90% a 95%. Conforme descrito no Capítulo 2, Seção 2.6.4, o método PN é semelhante ao conhecido método do Número Estrutural (AASHTO 1993) e tem as seguintes vantagens:

- Dados de numerosos pavimentos em operação foram utilizados para desenvolver o método. O tipo e detalhe dos dados sugerem o uso de um método relativamente simples e elimina o uso de um método de projeto Mecanicista-Empírico.
- O método fornece uma boa adequação aos dados de campo disponíveis.
- O método é robusto, e não pode ser manipulado facilmente para produzir projetos inadequados.

O método de projeto PN foi verificado para o tráfego de projeto de até 30 milhões de ESALs, com base nos dados de desempenho de longo prazo do pavimento (LTPP) de pavimentos com camadas de base de BSM. Os pavimentos sendo monitorados continuam a receber tráfego e o tráfego máximo do projeto aumentará com o tempo. Os pavimentos modelados utilizando este método requerem um valor CBR mínimo de subleito de 3%. Além disso, o exercício LTPP inclui rodovias com somente um limite de eixo legal de 80 kN. O método não foi calibrado para cargas mais altas de eixo (por exemplo, o limite legal de 13 toneladas na Grécia).

O método de projeto PN utilize um sistema de classificação de materiais para cada camada na estrutura do pavimento e a abordagem do projeto é, com efeito, um método inteligente de Número Estrutural. O Número de Pavimento é a soma de produtos da espessura da camada e seus respectivos valores de Dureza Eficaz de Longo Prazo (ELTS), conforme descrito na Seção 2.6.4. Algumas regras relacionadas às camadas do pavimento são:

- O potencial de espalhamento da carga de uma camada individual é um produto da sua espessura e seu valor de ELTS sob carga.
- O valor de ELTS de uma camada depende do tipo e classe do material e da sua localização na estrutura do pavimento.
- Materiais de subleito com grãos finos atuam de maneira a reduzir a tensão. Para estes materiais, a ELTS é principalmente determinada pela qualidade do material e pela região climática. Devido ao comportamento de redução da tensão, os materiais do subleito geralmente amaciam com a espessura reduzida da cobertura.
- Materiais com granulação graúda e não ligados atuam de forma a endurecer a tensão. Para estes materiais a ELTS é determinada principalmente pela qualidade do material e a dureza relativa da camada de suporte. A ELTS destes materiais aumentará com a dureza crescente do suporte, por meio de um limite do coeficiente modular, até uma dureza máxima que é determinada pela qualidade do material.
- BSMs são pressupostos como atuando de maneira similar a materiais granulares graúdos, mas com uma resistência coesiva mais alta. A resistência coesiva está sujeita a rupturas durante o carregamento e, portanto, pode ocorrer algum abrandamento ao longo do tempo. A taxa de abrandamento é determinada principalmente pela dureza do suporte, o que determina o grau de cisalhamento na camada. Contudo, devido à resistência coesiva mais elevada nos BSMs, estas camadas são menos sensíveis à dureza do suporte do que materiais granulares não ligados e, consequentemente, podem sustentar limites de coeficientes modulares mais altos. (Se, no entanto, o teor de cimento de uma mistura de BSM exceder 1%, supõe-se que o material deve comportar-se como um material cimentado.)

Os princípios básicos acima apresentam diversos conceitos, tais como ELTS, limite do coeficiente modular, dureza máxima e comportamento de endurecimento por tensão (ou abrandamento). Estes devem ser entendidos para utilizar o método. (Consulte TG2 (2009) para mais detalhes).

Método de Projeto do Coeficiente de Tensão do Desviador

Os projetos de recuperação de pavimentos concebidos para suportar um tráfego projetado de > 30 milhões de ESALs, exigem uma análise estrutural mais avançada do que somente o Método de Projeto do Número de Pavimento. Nesses casos, o Método do Coeficiente de Tensão do Desviador deve ser adotado. O Método do Coeficiente de Tensão do Desviador se baseia na premissa, comprovada em pesquisa, de que a taxa de deformação permanente em uma camada de BSM é uma função do coeficiente de tensão do desviador aplicada em comparação com a tensão máxima do desviador do BSM (com falha).

Isto é mostrado na equação abaixo.

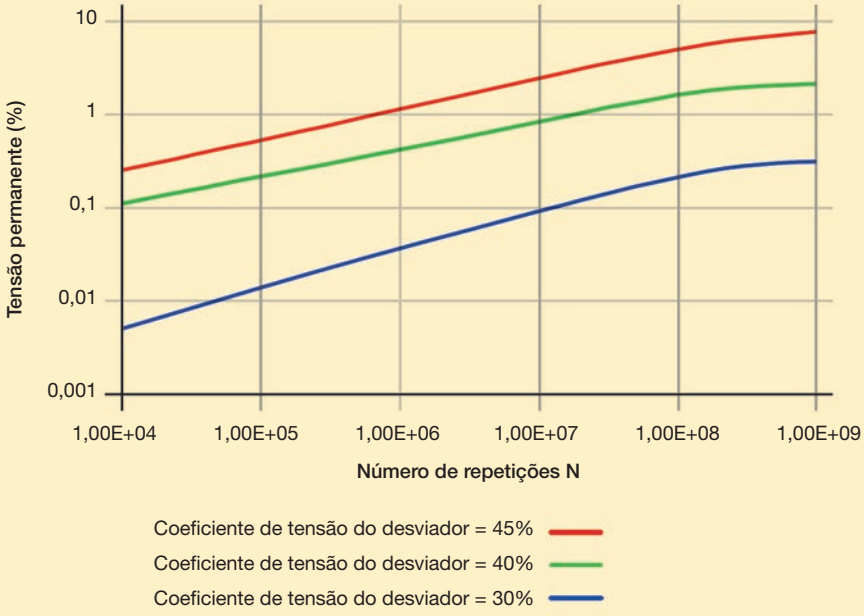
$$\text{Coeficiente de Tensão do Desviador} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{1.f} - \sigma_3}$$

Na qual σ_1 = tensão principal aplicada à camada de BSM a partir da análise de M-E
σ_3 = menor tensão principal aplicada à camada de BSM a partir da análise de M-E
$\sigma_{1,f}$ = tensão principal séria em falha do teste triaxial do BSM

Para executar uma análise Mecanicista-Empírica da estrutura do pavimento, um valor do Módulo Resiliente é necessário para o BSM. Com base no teste triaxial e no monitoramento do pavimento, os seguintes valores são considerados razoáveis para esta finalidade.

Faixas dos Módulos Resilientes para BSMs		
Tipo de material	**Teor de betume do BSM (%)**	**Módulos Resilientes MR (MPa)**
100% RAP	1,6 a 2,0	1.000 a 2.000
RAP / pedra britada (mistura 50:50)	1,8 a 2,5	800 a 1.500
Brita graduada	2,0 a 3,0	600 a 1.200
Cascalho natural (PI < 10, CBR>45)	2,2 a 3,5	400 a 800
Cascalho natural (PI < 10, CBR>25)	2,5 a 4,0	300 a 600

A forma preferida de abordar um projeto avançado de pavimentação é selecionar um limite do coeficiente de tensão do desviador dependente da importância da rodovia sob análise e do tráfego do projeto. A figura a seguir ilustra como a vida do pavimento reduz enquanto o coeficiente de tensão do desviador aumenta.



Limites recomendados para o coeficiente de tensão do desviador com base nas relações indicadas acima e considerando profundidades de reciclagem típicas são fornecidos na tabela abaixo.

Limite do Coeficiente de Tensão do Desviador para uma deformação máxima de 10 mm na camada de BSM	
Confiabilidade do projeto 95% (Autoestradas com tráfego pesado)	Confiabilidade do projeto 80 - 90% (Rodovias com tráfego moderado)
> 35%	> 40%

É reconhecido que BSMs possuem propriedades que dependem da tensão. Quando o teste triaxial dinâmico tiver fornecido dados para desenvolver as relações entre o Módulo Resiliente e tensão aplicada a um BSM específico, então uma análise interativa dependente da tensão de múltiplas camadas pode ser seguida. Isso exige que a camada de BSM seja subdividida em subcamadas de 25 mm a 50 mm, e cada uma é então analisada quanto à convergência do Módulo Resiliente. Tais análises produzirão distribuições de tensão mais realistas na camada de BSM que são, por sua vez, utilizadas para determinar o coeficiente de tensão do desviador. O coeficiente calculado da tensão do desviador pode ser utilizado para estabelecer se a camada de BSM é ou não a camada crítica no pavimento (isto é, a camada que alcança uma condição terminal em primeiro lugar e precipita as falhas em outras camadas).

A abordagem do coeficiente de tensão do desviador fornece projetos razoáveis com uma preservação suficiente. Contudo, isso requer um conhecimento seguro da engenharia de pavimentação e somente deve ser utilizado por pessoas experientes.

4.4 Sumário: Vantagens e desvantagens dos agentes estabilizadores de cimento e betume

Estabilização com Cimento	
Vantagens	**Desvantagens**
• Disponibilidade. O cimento pode ser obtido em todo o mundo, sempre em sacos, e frequentemente a granel. • Custo. Em comparação com o betume, o cimento é barato. • Facilidade de aplicação. O cimento sempre pode ser espalhado manualmente na ausência de espargidores de grandes volumes ou unidades de mistura de cimento. • Aceitação. O cimento é bem conhecido pela indústria da construção. Métodos de teste padrão e especificações normalmente estão disponíveis. • Melhoria significativa da resistência à compressão e das propriedades de durabilidade da maioria dos materiais.	• As rachaduras por encolhimento são inevitáveis. Contudo, podem ser minimizadas. • Aumenta a rigidez em pavimentos flexíveis. • Exige cura e proteção apropriadas do tráfego imediato, principalmente para veículos pesados com movimentação lenta.

Estabilizando com Betume (Emulsão e Espuma)	
Vantagens	**Desvantagens**
• Flexibilidade. Estabilizar com betume cria um tipo de material visco-elástico-plástico, com propriedades de cisalhamento melhoradas (coesão e resistência à deformação). • Facilidade de aplicação. Um caminhão tanque é acoplado à recicladora e o betume injetado através de uma barra espargidora (tipo especial de barra espargidora para espuma de asfalto). • Aceitação. As emulsões betuminosas são relativamente bem conhecidas pela indústria da construção. Métodos de testes padrão e especificações estão disponíveis. • Taxa de ganho da resistência. O material pode trafegar imediatamente após a colocação e compactação, especialmente com espuma de BSM. • Durabilidade. Os BSMs tendem a prender as partículas mais finas, encapsulando-as no betume. Isso impede que elas reajam à água e a qualquer potencial bombeamento.	• Custo. O betume é relativamente caro. • As emulsões betuminosas não são normalmente manufaturadas no local. O processo de manufatura exige um controle rígido da qualidade. Os emulsionantes são caros. Os custos de transporte aumentados pelo componente água, e não somente betume. (A espuma de asfalto utiliza betume com grau de penetração padrão. Não existem custos adicionais de manufatura e, portanto, é menos dispendioso do que a emulsão betuminosa.) • A espuma de asfalto exige que o betume esteja quente, normalmente acima de 160° C. Isso, muitas vezes, exige instalações especiais para aquecimento e precauções de segurança adicionais. • A espuma de BSM exige estrita aderência às exigências da granulometria, especialmente a fração < 0,075 mm. (A emulsão BSM é mais condescendente a este respeito.) • Quando o teor de umidade do material no pavimento existente estiver próximo ao OMC, a saturação ocorrerá quando a emulsão for adicionada. • A cura pode levar um longo tempo para a emulsão de BSM. O desenvolvimento da resistência é ditado pela perda de umidade. • Disponibilidade. A formulação exigida para uma emulsão apropriada a uma aplicação específica de reciclagem pode não estar sempre disponível.

5 Soluções de reciclagem

5.1	**Diretrizes para a reciclagem de diferentes pavimentos**	**165**
5.1.1	Rodovias com tráfego leve (capacidade estrutural: 0,3 milhão de ESALs)	166
5.1.2	Rodovias com baixo volume (capacidade estrutural: 1 milhão de ESALs)	168
5.1.3	Rodovias rurais secundárias (capacidade estrutural: 3 milhões de ESALs)	170
5.1.4	Rodovias rurais principais (capacidade estrutural: 10 milhões de ESALs)	172
5.1.5	Autoestradas interurbanas (capacidade estrutural: 30 milhões de ESALs)	174
5.1.6	Autoestradas principais com múltiplas pistas (capacidade estrutural: 100 milhões de ESALs)	176
5.2	**Alternativas de recuperação do pavimento**	**178**
5.2.1	Pavimento existente	180
5.2.2	Requisitos da recuperação	181
5.2.3	Opções de recuperação	182
5.2.4	Requisitos da manutenção	190
5.2.5	Custos de construção & manutenção	192
5.2.6	Consumo de energia	195
5.2.7	Comentários importantes	199

Todas as soluções de recuperação de pavimentos são específicas dos projetos. Conforme descrito no Capítulo 2, cada local de construção é diferente; a profundidade da reciclagem e o tipo de estabilização apropriado para uma rodovia específica são ditados pelo(s)/a(s):

- tráfego previsto ao longo do período do projeto (a necessidade de capacidade estrutural),
- composição da estrutura do pavimento existente,
- materiais nas várias camadas, especialmente naquelas no topo do pavimento,
- número de camadas sobrepostas ao subleito (a espessura total da cobertura), e
- resistência do subleito subjacente.

Este capítulo fornece diretrizes para auxiliar engenheiros de projeto a visualizarem o tipo de estruturas de pavimentação que pode ser obtido pela reciclagem. São ilustradas soluções típicas para diferentes categorias de tráfego, que variam de rodovias com baixo volume (< de 1 milhão de ESALs) a autoestradas com tráfego pesado (> 100 milhões de ESALs), cada uma com uma seleção de condições realistas para o pavimento existente que necessita ser recuperado.

Isso é seguido por um exemplo que mostra diferentes soluções para recuperar uma rodovia específica, sendo que duas delas exigem que o pavimento existente seja reciclado. Este exercício inclui a análise dos custos envolvidos no exercício inicial de recuperação, as exigências de manutenção durante a vida útil e o custo de recuperação do pavimento ao final da vida de serviço (análise dos custos de toda a vida). Também incluído neste exercício encontra-se uma seção sobre a energia consumida por várias atividades de construção e manutenção durante toda a vida de serviço. Combinar os custos de toda a vida com a energia consumida é útil para a tomada de decisões.

5.1 Diretrizes para a reciclagem de diferentes pavimentos

As diretrizes apresentadas nesta seção enfocam a reciclagem. Seis diferentes categorias de tráfego são mostradas:

- pavimentos leves com uma capacidade estrutural de aproximadamente 300.000 ESALs que normalmente seriam aplicáveis a rodovias de acesso rural;
- rodovias com baixo volume e capacidade estrutural de 1 milhão de ESALs, típicas de rodovias propriedade rural-mercado;
- rodovias secundárias com uma capacidade estrutural de 3 milhões de ESALs;
- rodovias rurais principais com uma capacidade estrutural de 10 milhões de ESALs;
- autoestradas interurbanas com capacidade estrutural de 30 milhões de ESALs; e
- importantes autoestradas com múltiplas pistas e capacidade estrutural de 100 milhões de ESALs.

Três diferentes aplicações de reciclagem são consideradas para cada categoria:

- reciclagem do pavimento existente sem a adição de agentes estabilizantes (modificação mecânica ou retrabalho),
- reciclagem com um agente estabilizando de cimento (a espessura mínima de 150 mm foi adotada para tais camadas), e
- reciclagem com um agente estabilizante de betume (a espessura mínima para tais camadas quando recicladas no local é de 100 mm).

Para categorias de tráfego abaixo de 30 milhões de ESALs, são considerados três diferentes cenários para pavimentos existentes, essencialmente ditados pela resistência do subleito, profundidade da cobertura e pela qualidade do material nas camadas existentes. As três diferentes condições de subleito pressupostas são:

- “Boa”, com um valor de CBR in situ entre 10% e 25%,
- “Regular”, com um valor de CBR in situ entre 3% e 10%, e
- “Ruim” com um valor de CBR de 3% ou menos.

Cada cenário foi cuidadosamente selecionado para ser pertinente ao tipo de pavimento que deve ser recuperado e/ou aperfeiçoado. A mesma abordagem realista foi adotada para categorias de tráfego superiores a 30 milhões de ESALs; os pavimentos existentes para este tráfego pesado provavelmente serão razoavelmente sólidos com cobertura suficiente.

5.1.1 Rodovias com tráfego leve (capacidade estrutural: 0,3 milhão de ESALs)

As rodovias existentes que se enquadram nesta categoria são normalmente rodovias de cascalho ou rodovias com um tratamento leve da superfície. No mínimo, a estrada existente incluirá uma camada de cascalho apropriada com um material do curso com CBR superior a 25%. (Se não for este o caso, então a rodovia necessita ser construída; não pode simplesmente ser reciclada pois não há camada estrutural para reciclar.)

Os projetos de mistura devem garantir a obtenção de resistência suficiente pela adição de agentes estabilizantes. Os requisitos mínimos para estes pavimentos com tráfego leve são:

- Estabilização de cimento (Indicado como CTB no quadro): UCS > 1 MPa
- Estabilização de betume (Indicado como BSM no quadro): ITS_{DRY} > 125 kPa, ITS_{WET} > 50 kPa

- Tratamento superficial com pedriscos
- Material estabilizado de betume IB (BSM)
- Material estabilizado de cimento (CTB)
- CBR > 100 Novo GCS
- CBR > 80 GCS (brita graduada)
- 45 < CBR < 80 (cascalho graúdo)
- 25 < CBR < 45 (cascalho natural)
- 15 < CBR < 25 (cascalho / solo)
- 10 < CBR < 15 (solo lodoso / arenoso)
- 7 < CBR < 10 (solo lodoso)
- 3 < CBR < 7 (solo lodoso / argiloso)

Regras

1. **Reciclando com cimento:**
   espessura mínima: 150 mm
2. **Reciclando com betume:**
   espessura mínima: 100 mm

	Pavimento existente			Reciclar /
		Espes-sura mm	CBR %	
Bom suporte				2º: Importar 125 mm (nova camada)
		150	30	1º: Retrabalhar 100 mm
		∞	10	
Suporte regular				2º: Importar 150 mm (nova camada)
		150	30	1º: Retrabalhar 100 mm
		∞	7	
Suporte insuficiente				2º: Importar 150 mm (nova camada)
		150	30	1º: Importar 100 mm Reciclar 125 mm
		∞	3	

Modificar mecanicamente			Reciclar com cimento ou cal			Reciclar com betume		
	Espes-sura mm	CBR %		Espes-sura mm	CBR %		Espes-sura mm	CBR %
	125	50						
	100	30	Reciclar 150 mm com cimento	150	CTB	Reciclar 100 mm com betume	100	BSM
	50						50	30
	∞	10		∞	10		∞	10
	150	50						
	100	30	Importar 125 mm Reciclar 150 mm com cimento	150	CTB	Importar 50 mm Reciclar 100 mm com betume	100	BSM
	50			125	30		100	30
	∞	7		∞	7		∞	7
	150	50						
	125	30	Importar 175 mm Reciclar 200 mm com cimento	200	CTB	Importar 100 mm Reciclar 125 mm com betume	125	BSM
	125			125	30		125	30
	∞	3		∞	3		∞	3

Tratamento superficial com pedriscos (normalmente tratamento único) é um tratamento de superfície apropriado para estes pavimentos

5.1.2 Rodovias com baixo volume (capacidade estrutural: 1 milhão de ESALs)

Rodovias existentes com baixo volume normalmente incluirão um curso de cascalho com um tratamento da superfície (tratamento com pedriscos) sobre uma estrutura relativamente leve construída com cascalho natural.

Os projetos de mistura devem garantir uma resistência suficiente pela adição de agentes estabilizantes. Os requisitos mínimos para estes pavimentos de baixo volume são:

- Estabilização com cimento (Indicado como CTB no quadro): UCS > 1 MPa
- Estabilização com betume (Indicado como BSM no quadro): ITS_{DRY} > 175 kPa, ITS_{WET} > 75 kPa

- Tratamento de superfície com pedriscos
- Material estabilizado com betume IB (BSM)
- Material estabilizado com cimento (BSM)
- CBR > 100 Novo GCS
- CBR > 80 GCS (brita graduada)
- 45 < CBR < 80 (cascalho graúdo)
- 25 < CBR < 45 (cascalho natural)
- 15 < CBR < 25 (cascalho / solo)
- 10 < CBR < 15 (solo arenoso lodoso)
- 7 < CBR < 10 (solo lodoso)
- H 3 < CBR < 7 (solo argiloso lodoso)

Regras

1. **Reciclando com cimento:**
   espessura mínima: 150 mm
2. **Reciclando com betume:**
   espessura mínima: 100 mm

	Pavimento existente			Reciclar /
		Espes-sura mm	CBR %	
Bom suporte				Importar 75 mm Reciclar 125 mm
		150	30	
		150	10	
		∞	10	
Suporte regular				Importar 100 mm Reciclar 150 mm
		150	30	
		150	10	
		∞	7	
Suporte insuficiente				2º: Importar 150 mm (nova camada) 1º: Retrabalhar 150 mm
		150	30	
		150	10	
		∞	3	

	Pavimento existente			Duas partes
				Reciclar in
		Espes-sura mm	CBR %	
Suporte insuficiente				**Etapa 1**
		150	30	Reciclar 200 mm com cal
		150	10	
		∞	3	

Modificar mecanicamente			Reciclar com cimento ou cal			Reciclar com betume		
	Espes-sura mm	CBR %		Espes-sura mm	CBR %		Espes-sura mm	CBR %
	125	50						
	100	30	Reciclar 150 mm com cimento	150	CTB	Reciclar 100 mm com betume	100	BSM
	150	10		150	10		150	10
	∞	10		∞	10		∞	10
	150	50						
	100	30	Reciclar 150 mm com cimento	150	CTB	Reciclar 100 mm com betume	100	BSM
	150	10		150	10		150	10
	∞	7		∞	7		∞	7
	150	50						
	150	30	Reciclar 250 mm com cimento	250	CTB	Reciclar 150 mm com betume	150	BSM
	150	10		50	10		150	10
	∞	3		∞	3		∞	3

Reciclagem: Cal para modificar a plasticidade e betume para resistência					
Colocar com cal			Re-reciclar com betume		
	Espes-sura mm	CBR %	Etapa 2	Espes-sura mm	CBR %
	200	CTB	Reciclar 100 mm com betume	100	BSM
				100	CTB
	100	10		100	10
	∞	3		∞	3

Tratamento superficial com pedriscos (normalmente tratamento duplo) é um tratamento apropriado para a superfície destes pavimentos

5.1.3 Rodovias rurais secundárias (capacidade estrutural: 3 milhões ESALs)

Rodovias existentes com baixo volume normalmente incluirão um curso de cascalho com um tratamento de superfície (tratamento superficial com pedriscos) sobreposto a uma estrutura de pavimento relativamente leve construída com cascalho natural.

Os projetos de mistura devem garantir a obtenção de resistência suficiente pela adição de agentes estabilizantes. Os requisitos mínimos para estes pavimentos com baixo volume são:

- Estabilização com cimento (Indicada como CTB no quadro): UCS > 2 MPa
- Estabilização com betume (Indicada como BSM no quadro): ITS_{DRY} > 225 kPa, ITS_{WET} > 100 kPa, ITS_{EQUIL} > 175 kPa

- Tratamento superficial com pedriscos
- Material estabilizado de betume IB (BSM)
- Material estabilizado de cimento (CTB)
- CBR > 100 Novo GCS
- CBR > 80 GCS (brita graduada)
- 45 < CBR < 80 (cascalho graúdo)
- 25 < CBR < 45 (cascalho natural)
- 15 < CBR < 25 (cascalho / solo)
- 10 < CBR < 15 (solo arenoso lodoso)
- 7 < CBR < 10 (solo lodoso)
- 3 < CBR < 7 (solo argiloso lodoso)

Regras

1. **Reciclando com cimento:** espessura mínima: 150 mm
2. **Reciclando com betume:** espessura mínima: 100 mm

	Pavimento existente			Reciclar /
		Espessura mm	CBR %	
Bom suporte				Importar 100 mm Reciclar 125 mm
		150	80	
		150	50	
		∞	20	
Suporte regular				2º: Importar 150 mm (nova camada) 1º: Retrabalhar 100 mm
		150	80	
		150	50	
		∞	7	
Suporte insuficiente				2º: Importar 150 mm (nova camada) 1º: Importar 50 mm Reciclar 200 mm
		150	80	
		150	50	
		150	10	
		∞	3	

Modificar mecanicamente			Reciclar com cimento ou cal			Reciclar com betume		
	Espes-sura mm	CBR %		Espes-sura mm	CBR %		Espes-sura mm	CBR %
	125	100	Reciclar 250 mm com cimento	250	CTB	Reciclar 125 mm com betume	125	BSM
	125	80						
	150	50					150	50
	∞	20		∞	20		∞	20
	150	100	Importar 75 mm Reciclar 275 mm com cimento	275	CTB	Reciclar 150 mm com betume	150	BSM
	100	80						
	50							
	150	50		100	50		150	50
	∞	7		∞	7		∞	7
	150	100	Importar 100 mm Reciclar 300 mm com cimento	300	CTB	Reciclar 200 mm com betume	200	BSM
	200	80						
	150	50		100	50		100	50
	150	10		150	10		150	10
	∞	3		∞	3		∞	3

Uma vedação competente com pedriscos (Vedação Cape ou vedação tripla) é um tratamento de superfície apropriado para estes pavimentos, apesar de a aplicação de asfalto fino (30 mm) seja frequentemente preferida, especialmente em regiões úmidas e/ou frias

5.1.4 Rodovias rurais principais (capacidade estrutural: 10 milhões ESALs)

Rodovias existentes que se enquadram nesta categoria normalmente seriam construídas com uma estrutura de pavimento razoável, com uma superfície de asfalto fino ou com múltiplos tratamentos com pedriscos. Invariavelmente, estes pavimentos seriam construídos utilizando pedra britada ou cascalho natural de boa qualidade (CBR%> 80), mas podem incluir uma camada de material de cimento estabilizado.

Os projetos de mistura devem garantir a obtenção de resistência suficiente pela adição de agentes estabilizantes. Os requisitos mínimos para esses pavimentos rodoviários principais são:

- Estabilização com cimento (Indicada como CTB no quadro): UCS > 2 MPa
- Estabilização com betume (Indicada como BSM no quadro): ITS_{DRY} > 225 kPa, ITS_{WET} > 100 kPa, ITS_{EQUIL} > 175 kPa, coesão > 250 kPa, ângulo de fricção > 40°

- Asfalto
- Material estabilizado com betume B (BSM)
- Material estabilizado com cimento (CTB)
- CBR > 100 Novo GCS
- CBR > 80 GCS (brita graduada)
- 45 < CBR < 80 (cascalho graúdo)
- 25 < CBR < 45 (cascalho natural)
- 15 < CBR < 25 (cascalho / solo)
- 10 < CBR < 15 (solo arenoso lodoso)
- 7 < CBR < 10 (solo lodoso)
- 3 < CBR < 7 (solo argiloso lodoso)

Regras

1. **Reciclando com cimento:** espessura mínima: 150 mm
2. **Reciclando com betume:** espessura mínima: 100 mm

	Pavimento existente			Reciclar /
		Espessura mm	CBR %	
Bom suporte		40	AC	2º: Importar 125 mm (nova camada) 1º: Retrabalhar 125 mm
		150	80	
		150	50	
		∞	20	
Suporte regular		40	AC	2º: Importar 150 mm (nova camada) 1º: Importar 60 mm Reciclar 125 mm
		150	80	
		150	50	
		∞	7	
Suporte insuficiente		40	AC	2º: Importar 150 mm (nova camada) 1º: Importar 185 mm - Reciclar 250 mm
		150	80	
		150	50	
		150	10	
		∞	3	

Modificar mecanicamente			Reciclar com cimento ou cal			Reciclar com betume		
	Espes-sura mm	CBR %		Espes-sura mm	CBR %		Espes-sura mm	CBR %
	40	HMA	2º: Importar 125 mm (nova camada) 1º: Reciclar 250 mm com cimento	40	HMA	Reciclar 125 mm com betume	40	HMA
	125	100		125	100		125	BSM
	125	80		250	CTB			
							150	50
	150	50		90	50		∞	20
	∞	20		∞	20			
	40	HMA	2º: Importar 150 mm (nova camada) 1º: Reciclar 275 mm com cimento	40	HMA	Reciclar 200 mm com betume	40	HMA
	150	100		150	100		200	BSM
	125	80		275	CTB			
	125						140	50
	150	50					∞	7
	∞	7		∞	7			
	40	HMA	2º: Importar 150 mm (nova camada 1º: Reciclar 300 mm com cimento	40	HMA	Importar 50 mm Reciclar 250 mm com betume	40	HMA
	150	100		150	100		250	BSM
	250	80		300	CTB			
	125						140	50
	150	50					150	10
	150	10		150	10		∞	3
	∞	3		∞	3			

Uma cobertura de asfalto com 40 mm de espessura é apropriada para estes pavimentos. Contudo, em regiões secas, um tratamento de superfície competente (por exemplo, Vedação Cape) é normalmente preferido

5.1.5 Autoestradas interurbanas (capacidade estrutural: 30 milhões de ESALs)

Rodovias existentes desta categoria normalmente são construídas com uma estrutura de pavimento profunda e normalmente incluirão uma camada básica e cobertura de asfalto. Uma pedra britada de boa qualidade ou bom cascalho natural (CBR%> 80), invariavelmente encontra-se sob as camadas de asfalto, ou uma camada de material de cimento estabilizado.

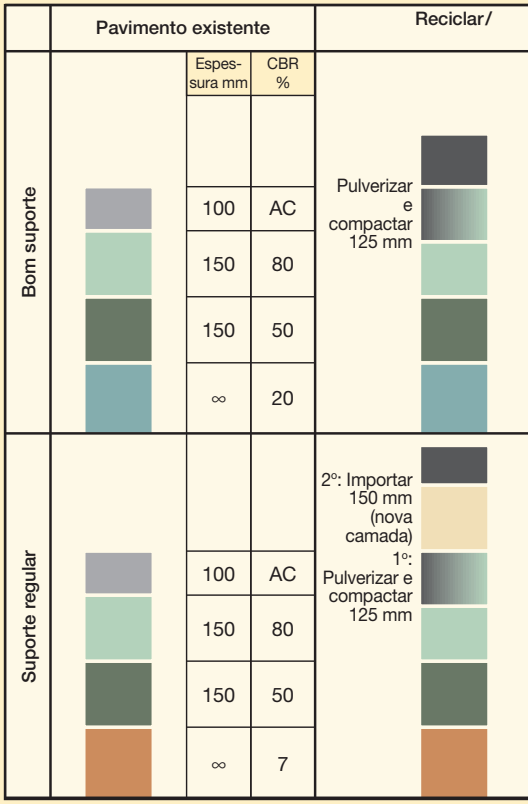
Os projetos de mistura devem garantir a obtenção de resistência suficiente pela adição de agentes estabilizantes. Os requisitos mínimos para esses pavimentos rodoviários principais são:

- Estabilização com cimento (indicada como CTB no quadro): UCS > 2 MPa
- Estabilização com betume (indicada como BSM no quadro): ITS_{DRY} > 225 kPa, ITS_{WET} > 100 kPa, ITS_{EQUIL} > 175 kPa, coesão > 250 kPa, ângulo de fricção > 40°

- Asfalto
- Material estabilizado com betume B (BSM)
- Material estabilizado com cimento (CTB)
- CBR > 100 Novo GCS
- CBR > 80 GCS (brita graduada)
- 45 < CBR < 80 (cascalho graúdo)
- 25 < CBR < 45 (cascalho natural)
- 15 < CBR < 25 (gravel / soil)
- 10 < CBR < 15 (solo arenoso lodoso)
- 7 < CBR < 10 (solo lodoso)
- 3 < CBR < 7 (solo argiloso lodoso)

Regras

1. **Reciclando com cimento:** espessura mínima: 150 mm
2. **Reciclando com betume:** espessura mínima: 100 mm



Duas opções diferentes são mostradas para o pavimento que é reciclado com cimento ou cal, uma com uma cada de material em pedra britada no topo da camada reciclada / estabilizada com cimento, a outra com asfalto.

Modificar mecanicamente		Reciclar com cimento ou cal						Reciclar com betume		
		Revestimento de pedra britada			Camada de HMA					
Espes-sura mm	CBR %		Espes-sura mm	CBR %		Espes-sura mm	CBR %		Espes-sura mm	CBR %
		2º:	50	HMA						
90	HMA	Importar 125 mm (nova camada)	125	100		80	HMA			
125	100	1º: Reciclar 275 mm com cimento	275	CTB	Reciclar 275 mm com cimento	275	CTB	Reciclar 250 mm com betume	50	HMA
125	80								250	BSM
150	50		125	50		125	50		150	50
∞	20		∞	20		∞	20		∞	20
90	HMA	2º:	50	HMA						
150	100	Importar 150 mm (nova camada)	150	100		90	HMA		50	HMA
125	100	1º: Reciclar 300 mm com cimento	300	CTB	Reciclar 300 mm com cimento	300	CTB	Importar 150 mm Reciclar 275 mm com betume	275	BSM
125	80								125	80
150	50		100	50		100	50		150	50
∞	7		∞	7		∞	7		∞	7

Estes pavimentos sempre recebem uma cobertura asfáltica com uma espessura mínima de 40 mm

5.1.6 Autoestradas principais com múltiplas pistas (capacidade estrutural: 100 milhões ESALs)

Rodovias existentes desta categoria normalmente são construídas com uma estrutura de pavimento profunda e normalmente incluirão uma camada básica e cobertura de asfalto. Uma pedra britada de boa qualidade ou bom cascalho natural (CBR%> 80), invariavelmente encontra-se sob as camadas de asfalto, ou uma camada de material de cimento estabilizado. Normalmente, o asfalto vai estar em

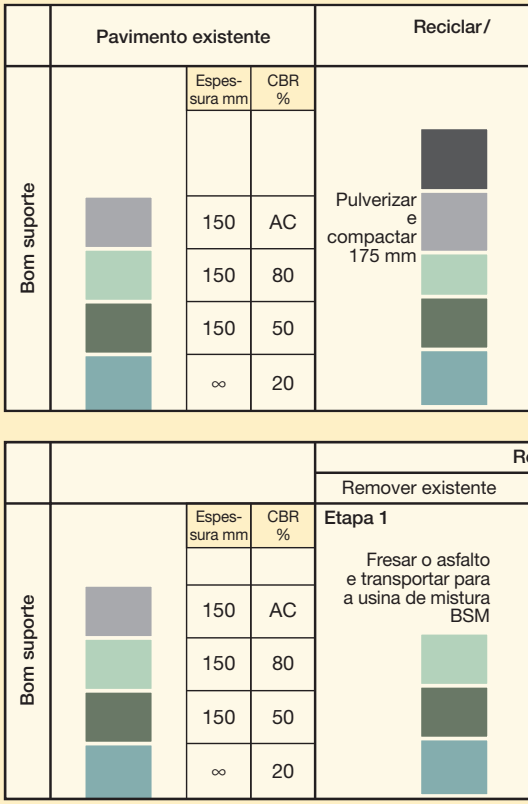
Os projetos de mistura devem garantir a obtenção de resistência suficiente pela adição de agentes estabilizantes. Os requisitos mínimos para esses pavimentos rodoviários principais são:

- Estabilização com cimento (indicada como CTB no quadro): UCS > 2 MPa
- Estabilização com betume (indicada como BSM no quadro): ITS_{DRY} > 225 kPa, ITS_{WET} > 100 kPa, ITS_{EQUIL} > 175 kPa, coesão > 250 kPa, ângulo de fricção > 40°

- Asfalto
- Material estabilizado com betume B (BSM)
- Material estabilizado com cimento (CTB)
- CBR > 100 Novo GCS
- CBR > 80 GCS (brita graduada)
- 45 < CBR < 80 (cascalho graúdo)
- 25 < CBR < 45 (cascalho natural)
- 15 < CBR < 25 (cascalho / solo)
- 10 < CBR < 15 (solo arenoso lodoso)
- 7 < CBR < 10 (solo lodoso)
- 3 < CBR < 7 (solo argiloso lodoso)

Regras

1. **Reciclando com cimento:** espessura mínima: 150 mm
2. **Reciclando com betume:** espessura mínima: 100 mm



um estado de deterioração com rachaduras que afetam toda a profundidade da camada. Duas opções diferentes são mostradas para o pavimento que é reciclado com cimento ou cal, uma com uma cada de material em pedra britada no topo da camada reciclada / estabilizada com cimento, a outra com asfalto. Além disso, uma opção que envolve "reciclagem em duas partes" é incluída.

Modificar mecanicamente			Reciclar com cimento ou cal						Reciclar com betume		
			Revestimento de pedra britada			Camada de HMA					
	Espessura mm	CBR %		Espessura mm	CBR %		Espessura mm	CBR %		Espessura mm	CBR %
			Importar 150 mm (nova camada)	50	HMA						
	180	HMA		150	100		90	HMA		50	HMA
	175	100	Reciclar 300 mm com cimento	300	CTB	Reciclar 300 mm com cimento	300	CTB	Recycle 250 mm with bitumen	250	BSM
	125	80								50	80
	150	50		150	50		150	50		150	50
	∞	20		∞	20		∞	20		∞	20

eciclagem em duas partes para obter um pavimento composto profundo								
asfalto			Reciclar no local com cimento			Importar BSM reciclado & sobrepor		
	Espessura mm	CBR %	Etapa 2	Espessura mm	CBR %	Etapa 3	Espessura mm	CBR %
						Importar e pavimentar 150 mm BSM	50	HMA
							150	BSM
	150	80	Reciclar 250 mm com cimento	250	CTB		250	CTB
	150	50		50	50		50	50
	∞	20		∞	20		∞	20

Estes pavimentos sempre recebem uma cobertura de asfalto com uma espessura mínima de 50 mm

5.2 Alternativas de recuperação do pavimento

O desafio real de um engenheiro de pavimentação com a tarefa de realizar um projeto de recuperação é selecionar as opções alternativas para tratar um pavimento deteriorado. Muitas vezes tais comparações não vão além de exercícios simplistas de cálculo dos custos, normalmente restritos aos custos iniciais da construção. Além disso, as opções alternativas de recuperação não são frequentemente formuladas corretamente. Isso resulta em diferentes opções que tenham diferentes expectativas de vida (capacidade estrutural), tornando todas as comparações um exercício fútil da subjetividade. Além disso, a crescente conscientização da necessidade de reduzir o consumo de energia em todos os segmentos da vida traz uma nova dimensão à avaliação das atividades de construção.

Esta seção visa ilustrar a importância de três principais aspectos que devem ser abordados ao comparar pavimentos diferentes:

- as estruturas dos pavimentos comparados devem ter vidas de serviço similares. O pavimento pode ser inicialmente construído para fornecer uma capacidade estrutural suficiente pelo tempo da vida de serviço, com intervenções oportunas para atender às exigências funcionais. Como alternativa, uma abordagem de construção em fases pode ser adotada com intervenções para reforço que permitirão alcançar a vida de serviço;
- todos os custos incorridos na obtenção da vida de serviço necessária devem ser considerados, e não somente o custo inicial da construção, isto é, cradle to cradle. Desde que os diferentes pavimentos sejam concebidos corretamente para fornecer vidas de serviço similares, tal exercício é relativamente simples; e
- fornecer uma indicação do impacto que cada diferente pavimento tem sobre o meio ambiente, a energia consumida pelas atividades da construção para alcançar a vida de serviço necessária para cada pavimento diferente pode ser estimada e agregada.

Vários outros aspectos também podem ser incorporados ao comparar diferentes pavimentos ao longo de uma vida de serviço definida, sendo os custos do usuário da rodovia os mais importantes. Contudo, ao personalizar a manutenção e/ou as intervenções em etapas com a intenção de manter as propriedades funcionais do pavimento em níveis similares, esses podem ser ignorados pois todos contribuirão da mesma forma. Assim sendo, incluindo somente o custo de todas as atividades da construção e a energia consumidas no fornecimento inicial de uma estrutura adequada do pavimento, as várias intervenções necessárias durante a vida de serviço, bem como a recuperação ao final da vida útil são consideradas adequadas para comparar estruturas diferentes de pavimentos e retratar “o quadro real” que permita fazer uma comparação realista de toda a vida.

A seleção de opções de recuperação de pavimentos pode ser mais bem explicada por meio de exemplos. Esta seção utiliza a comparação de quatro opções diferentes para recuperar um pavimento hipotético e demonstrar um método proposto para incorporar o custo e a energia na determinação da opção ideal. Pressupomos uma estrutura típica de pavimento (em muitos países) consiste em concreto asfáltico espesso construído em camadas de material granulado. As quatro opções de recuperação selecionadas para a comparação incluem métodos convencionais de construção, bem como aqueles que incorporam a reciclagem do material do pavimento existente.

Os principais requisitos são uma capacidade estrutural de 20 milhões equivalente a cargas de eixo padrão de 80 kN (ESALs) ao longo de uma vida útil de 20 anos.

A manutenção / intervenções de reforço previstas e as necessidades de recuperação após 20 anos foram então definidas e todas as atividades da construção quantificadas. Estas quantidades permitem realizar um cálculo da estimativa de custos durante toda a vida, com base nas taxas unitárias que prevalecem na indústria da construção civil do país.

O Valor Atual dos Custos baseado nos custos de uma estimativa para toda a vida e diferentes taxas de desconto são então utilizados para avaliar as diferenças econômicas relativas.

Finalmente, as mesmas quantidades são utilizadas para determinar a quantidade de energia consumida durante a vida de serviço, incluindo a recuperação após 20 anos

5.2.1 Pavimento existente

A figura adjacente mostra a estrutura de um pavimento típico para uma rodovia com tráfego pesado. As rachaduras em toda da profundidade das camadas de asfalto indicam que o pavimento chegou ao fim da sua vida de serviço. As várias camadas do pavimento são em concreto asfáltico com 150 mm de espessura sobre 350 mm de material granular em duas camadas; uma camada de 150 mm de brita graduada de boa qualidade (CBR > 80%) sobre uma camada de 200 mm de espessura de cascalho natural (CBR > 45%). A cobertura total do subleito subjacente é, portanto, de 500 mm. Supõe-se que o subleito tenha um módulo resiliente in situ de 85 MPa.

Sintomas de deterioração são típicos para este tipo de estrutura do pavimento no final da vida útil. O material asfáltico sofreu rachaduras por fadiga que se propagaram por toda a espessura do asfalto. Tais rachaduras permitem a entrada da água no material subjacente, causando saturação e resultando no deslocamento hidráulico dos finos (bombeamento) quando sujeitos às cargas do trânsito intenso. A consequência do bombeamento é degradação da camada e do desenvolvimento de buracos na rodovia. Este pavimento chegou ao seu estado terminal e exige recuperação.

5.2.2 Requisitos da recuperação

Os objetivos da recuperação exigem uma vida útil de 20 anos. O tráfego previsto durante este período indica uma exigência estrutural da capacidade de 20 milhões de ESALs. Para atender às exigências normais de qualidade do deslocamento e resistência a derrapagens, uma superfície de fricção ultrafina (UTFC) da base é necessária. Tal cobertura da superfície deve fornecer uma vida de serviço entre seis e oito anos. Ao final da vida de serviço de 20 anos, a recuperação deverá restaurar a capacidade estrutural.

5.2.3 Opções de recuperação

Abaixo são avaliadas quatro opções alternativas de projeto, sendo que cada uma atende à exigência de capacidade de 20 milhões de ESALs. O Método de Projeto AASHTO 1993 (Números Estruturais) fornece um meio simples de avaliar estruturas alternativas de pavimentos, utilizando os seguintes dados de entrada para determinar o Número Estrutural exigido (SN_{REQ}):

- Condições de sustentação do subleito: CBR 15% (média 85 MPa / 12 392 psi)
- Confiabilidade: > 90%
- Desvio padrão: 0,45
- Operacionalidade inicial: 4,2
- Operacionalidade terminal: 2,5

Um valor de SN_{REQ} de 4,63 é obtido utilizando os dados acima como informações para um programa de computador SN apropriado.

Opção 1 - Remendos e camadas sobrepostas
Esta opção é popular em muitos países de primeiro mundo, principalmente devido à velocidade e simplicidade da construção. Partes com rachaduras severas que caem entre as rodas são fresadas e substituídas com asfalto novo antes de uma camada sobreposta ser aplicada. Uma fresadora com largura de corte de 1 m pode ser utilizada para cortar uma faixa com 75 mm de profundidade seguindo o trajeto da roda. O asfalto misturado quente (HMA) é utilizado como material de aterro, colocado por uma pavimentadora e compactadora.

Para minimizar a espessura da cobertura asfáltica, é utilizada uma abordagem de construção em etapas. Estima-se que uma base de asfalto com 60 m de espessura, coberta com um revestimento de UTFC de 30 mm de espessura deve fornecer uma vida de 7 anos antes de as rachaduras subjacentes à estrutura fatigada demandem uma intervenção. Isto é cronometrado para coincidir com a necessidade de substituir a superfície de UTFC pois essa chegaria ao final da sua vida funcional após 7 anos. Uma estimativa otimista é que a fresagem e substituição da camada de UTFC juntamente com o asfalto subjacente de 35 mm suportaria o trânsito do projeto por mais 7 anos, quando o mesmo tratamento será necessário para alcançar a vida útil total de 20 anos. Nesse estágio, a deterioração avançada (na forma de perda e saliências no betume) pode ser esperada no corpo do asfalto, exigindo uma fresagem profunda para solucionar o problema. As necessidades de recuperação devem ser as mesmas descritas na Opção 2 abaixo.

Opção 1 Remendos e camadas sobrepostas Determinação do número estrutural				
Camada	**Coeficiente da camada (C_L por polegada)**	**Coeficiente de drenagem (C_D)**	**Espessura da camada (t) (mm / polegada)**	**Contribuição da camada (C_L x C_D x t)**
Nova UTFC	0,44	1	30/1,2	0,53
Novo ligante asfáltico	0,42	1	60/2,4	1,01
Asfalto remendado	0,33 *	1	75/3	0,99
Asfalto envelhecido	0,22 **	1	75/3	0,66
Base antiga GCS	0,12 ***	1	150/6	0,72
Subleito de cascalho	0,10	0,9	200/8	0,72
			SN_{ACT}	**4,63**

* Coeficiente da camada estrutural de 0,33 reflete a composição nova da parte / envelhecida da parte da camada.

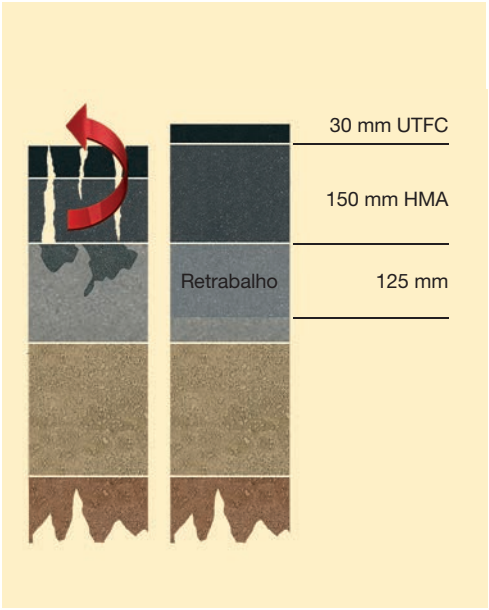
** Coeficiente da camada estrutural de 0,22 reflete a natureza envelhecida quebradiça do asfalto.

*** Coeficiente da camada estrutural de GCS reduzido de 0,14 a 0,12 desde que o bombeamento tenha ocorrido.

Opção 2 - Fresar e substituir
Este método de recuperação exige a fresagem e remoção de toda a espessura do asfalto deteriorado, afetado por rachaduras em toda a sua profundidade. A base de brita deverá ser reparada pelo retrabalho in situ (a uma profundidade nominal de 125 mm) antes da pavimentação com uma base de concreto asfáltico de 150 mm de espessura, seguida por um revestimento com UTFC de 30 mm.

A figura ilustra as operações necessárias. Retrabalhar a base em brita implicará no desvio do trânsito por tempo suficiente para permitir que o material da base seque antes da colocação do pavimento asfáltico, seguido pelo revestimento de UTFC.

A camada crítica neste pavimento é a base combinada de asfalto e as camadas de superfície que sofrerão rachaduras por fadiga devido ao nível de tensão elástica na parte inferior do concreto asfáltico. Duas intervenções de manutenção são previstas para coincidir com a vida prevista para o revestimento de UTFC. Após intervalos de 7 e 14 anos, somente o UTFC deverá ser substituído. Ao final da vida útil, rachaduras por fadiga alcançariam a superfície, permitindo que a água entre nas camadas granuladas subjacentes, causando a mesma deterioração e mecanismo de falha que o pavimento previamente recuperado sofreu. Nesse estágio, as exigências de recuperação devem ser as mesmas descritas na Opção 1 acima.

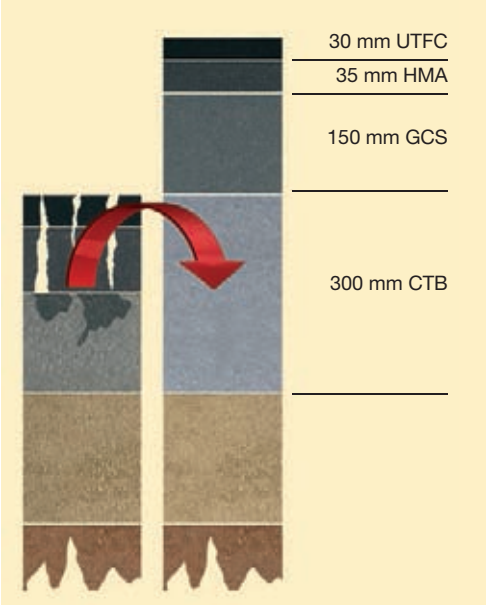


Opção 2 Fresar e substituir. Determinação do número estrutural				
Camada	**Coeficiente da camada C_L (por polegada)**	**Coeficiente de drenagem C_D**	**Espessura da camada (t) (mm / polegada)**	**Contribuição da camada C_L x C_D x t**
Nova UTFC	0,44	1	30/1,25	0,53
Nova base asfáltica	0,42	1	150/6	2,52
Base GCS retrabalhada	0,14	1	150/6	0,84
Subleito de cascalho	0,1	0,9	200/8	0,72
			SN_{ACT}	**4,61**

Opção 3 - Reciclar / estabilizar e sobrepor o cimento

Uma abordagem de recuperação padrão popular em várias partes do mundo é mostrada na figura abaixo. Ela exige que os 300 mm superiores do pavimento sejam reciclados in situ e estabilizados com cimento. Tal mistura do material recuperado do pavimento asfáltico e a brita normalmente exigiria a adição de cerca de 2,5% (por massa) de cimento para se obter uma resistência à compressão não confinada (UCS) de MPa 2.

Após um período de cura de 7 dias, uma nova base de brita graduada altamente densificada com 150 mm de espessura é construída no topo da nova sub-base. Por sua vez, obter altos níveis de densidade exige que a camada seja "cimentada" e isso demanda um período de secagem anterior à aplicação da camada de ligante asfáltico e do revestimento com UTFC.



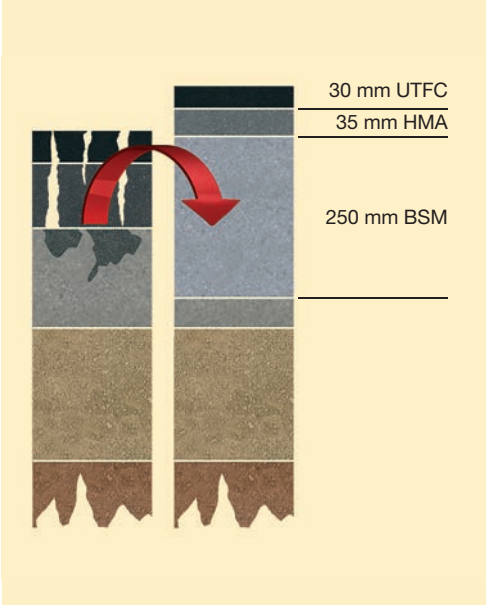
Como uma base de brita sem coesão não tem capacidade para suportar a ação do tráfego sem desfazer-se, este método de recuperação exige que todo o tráfego seja desviado das obras até a aplicação do asfalto.

A camada crítica neste pavimento é a base de brita. A condição pressuposta de falha é de 20 mm de deformação permanente seguida pela degradação devido à deterioração ativada pela umidade.

Duas intervenções de manutenção são previstas para coincidir com a vida prevista do revestimento de UTFC. Após 7 anos, somente o UTFC deverá ser substituído. Após mais 7 anos (isto é, 14 anos após a recuperação inicial), ambas as camadas de asfalto deverão ser substituídas para garantir uma vida de serviço de 20 anos. Ao final da vida de serviço, prevê-se uma deformação nos trajetos das rodas da ordem de 20 mm. Nesse estágio, as necessidades de recuperação devem ser as mesmas descritas na Opção 4 abaixo.

Opção 3 Reciclar / estabilizar e sobrepor cimento. Determinação do número estrutural.				
Camada	**Coeficiente da camada C_L (por polegada)**	**Coeficiente de drenagem C_D**	**Espessura da camada (t) (mm / polegada)**	**Contribuição da camada C_L x C_D x t**
Nova UTFC	0,44	1	30/1,2	0,53
Novo ligante asfáltico	0,42	1	35/1,3	0,54
Base antiga GCS	0,14	1	150/6	0,84
CTB reciclado	0,17	1	300/12	2,04
Subleito de cascalho	0,1	0,9	200/8	0,72
			SN_{ACT}	**4,67**

Opção 4 - Reciclar / estabilizar com betume
Este método de recuperação exige a reciclagem in situ dos 250 mm superiores do pavimento com a adição de um agente estabilizante de betume, como ilustrado na figura abaixo. (As taxas de aplicação supostas são de 2,2% de betume residual e 1% de cimento (por massa.)) Uma das razões para a popularidade deste método é o aumento na coesão do material estabilizado, o que permite que toda a camada seja aberta ao trânsito logo após a sua compactação (normalmente com uma densidade superior a 100% da densidade AASHTO T-180 modificada) e então concluída. Quando uma emulsão betuminosa corretamente formulada é utilizada como agente estabilizante, um retardo de 2 e 4 horas é necessário para permitir que a emulsão quebre suficientemente. A coesão imediata, entretanto, é obtida na compactação quando a espuma de asfalto é utilizada como agente de estabilização.



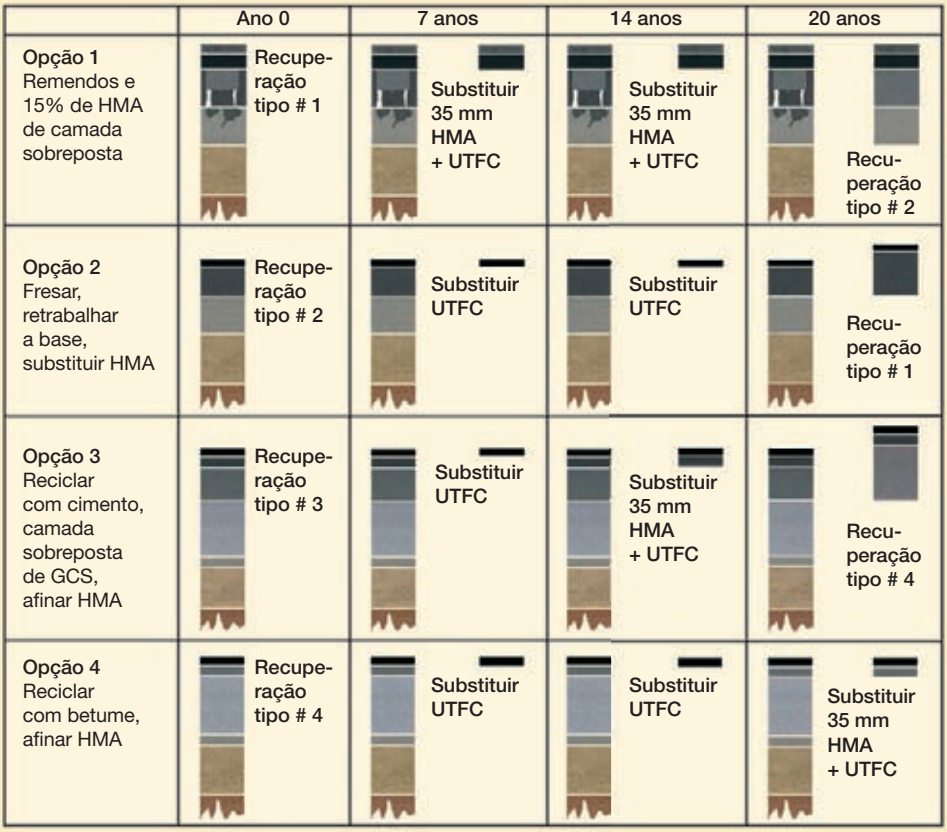
Como o revestimento de concreto asfáltico não pode ser aplicado até que o índice de umidade da base reciclada diminua (< 50% do ideal é normalmente especificado), uma pulverização da névoa da emulsão diluída normalmente é aplicada para impedir que a superfície acabada se deteriore em função da ação do tráfego.

A camada crítica neste pavimento é a base estabilizada de betume. Entretanto, o coeficiente de tensão do desviador é inferior a 30%, o que implica que a condição de falha pressuposta (20 mm de deformação permanente nos trajetos das rodas) não ocorrerá após um carregamento repetido de 20 milhões de ESALs. (Observação: A deformação permanente ocorrerá, mas a quantidade total será inferior a 20 mm.) Duas intervenções de manutenção são previstas para coincidir com a vida do revestimento com UTFC. Após intervalos de 7 e 14 anos, somente o UTFC necessitará ser substituído. Ao final da vida de serviço, a deformação permanente será evidente nos trajetos das rodas, e isso pode ser solucionado fresando e substituindo as camadas de asfalto. Isto fará com que o pavimento retorne à sua condição original e restaurará a capacidade estrutural.

Opção 4 Reciclar / estabilizar com betume. Determinação do número estrutural				
Camada	Coeficiente da camada C_L (por polegada)	Coeficiente de drenagem C_D	Espessura da camada (t) (mm / polegada)	Contribuição da camada $C_L \times C_D \times t$
Nova UTFC	0,44	1	30/1,2	0,53
Novo ligante asfáltico	0,42	1	35/1,3	0,54
Base BSM reciclada	0,26	1	250/10	2,60
GCS remanescente	0,14	1	50/2	0,28
Subleito de cascalho	0,1	0,9	200/8	0,72
			SN_{ACT}	**4,67**

5.2.4 Requisitos da manutenção

A figura abaixo resume as várias medidas de manutenção e recuperação explicadas acima, que são aplicáveis a este exemplo.



Intervalos de manutenção e recuperação necessários após 20 anos

5.2.5 Custos de construção & manutenção

A tabela abaixo é um exemplo do exercício que deve ser realizado para obter os custos das várias atividades de construção para cada opção de recuperação e para diferentes intervenções de manutenção. Este exemplo utiliza taxas unitárias médias que prevaleceram na indústria rodoviária sul-africana no ano de 2011.

Estimativa de custos para cada opção (Quantidades para 1 km de rodovia, com 10 m de largura)

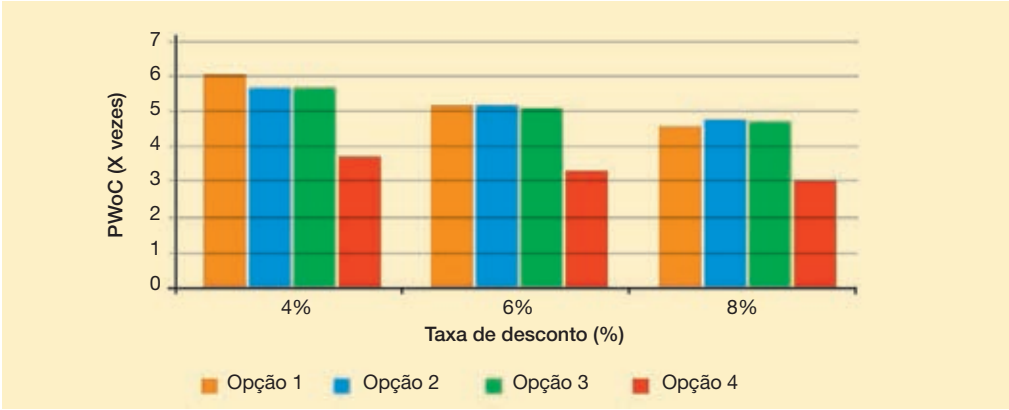
Programação			Recuperação opção # 1		Recuperação opção # 2		Recuperação opção # 3		
Item	Taxa	Unitária (US$)	Remendos / camadas sobrepostas		Fresar e substituir		CTB/GCS/HMA		
			Quantidade	Valor	Quantidade	Valor	Quantidade	Valor	
Fresagem Remendo HMA	m³ ton	30,0 70,0	281 703	8.438 49.219	1.500	45.000			
Reprocessar GCS Prime	m³ m³ m²	13,2 50,0 0,5			1.250 10.000	16.500 5.000	 3.150 10.000	 157.500 5.000	
Curso 30 UTFC HMA	m² ton ton	0,4 80,0 70,0	21.500 750 1.500	8.600 60.000 105.000	20.000 750 3.000	8.000 60.000 210.000	20.000 750 875	8.000 60.000 61.250	
Transporte por 20 km	m³ km	0,4	5.625	2.250	30.000	12.000	incl	0	
Reciclar 300 CTB 250 BSM	m³ m³	5,5 6,6					3.000	16.500	
Cimento Betume	ton ton	150,0 400,0					158	23.625	
				233.506		**356.500**		**331.875**	

utilizando taxas unitárias médias						
	Recuperação opção # 4		Intervenção # 1		Intervenção # 2	
	BSM / HMA		UTFC only		35 mm HMA + UTFC	
	Quanti-dade	Valor	Quanti-dade	Valor	Quanti-dade	Valor
			300	9,000	650	19,500
	30,000 750 875	12,000 60,000 61,250	10,000 750	4,000 60,000	20,000 750 875	8,000 60,000 61,250
			6,000	2,400	13,000	5,200
	2,500	16,500				
	53 116	7,875 46,200				
		191,825		**75,400**		**153,950**

Estes custos podem ser convertidos em índices, conforme mostrado na seguinte tabela.

Custo por quilômetro (taxa de desconto zero)					
Opção de recuperação	Recuperação inicial	Intervenção de 7 anos	Intervenção de 14 anos	Recuperação após 20 anos	Custo total
Opção 1	2,3X	1,5X	1,5X	3,6X	9,0X
Opção 2	3,6X	0,75X	0,75X	2,3X	7,4X
Opção 3	3,3X	0,75X	1,9X	1,9X	7,5X
Opção 4	1,9X	0,75X	0,75X	1,5X	5,0X

O efeito de diferentes taxas de desconto pode ser avaliado utilizando o modelo de Valor Atual dos Custos (PWoC), conforme mostrado na figura abaixo. Esta figura enfatiza a importância do valor do dinheiro pelo tempo. Não somente as classificações das diferentes opções são afetadas (Opções 1, 2 e 3), mas este exercício enfatiza o real benefício de adotar uma tecnologia que fornece um desempenho melhorado ao longo de toda a vida de serviço.



Valor Atual dos Custos de Opções Alternativas de Recuperação

5.2.6 Consumo de energia

A crescente conscientização sobre as mudanças climáticas está fazendo com que a sociedade se preocupe mais com o consumo de energia. A indústria da construção civil não é diferente, e diversos estudos foram realizados para estimar a quantidade de energia consumida, particularmente na construção de rodovias em que grandes máquinas são utilizadas e elevadas quantidades de materiais são consumidas ou transportadas.

Os estudos foram realizados para avaliar quanta energia é consumida na produção dos materiais de construção (por exemplo, betume, cimento, agregados, etc.), assim como as várias atividades da construção (por exemplo escavar, transportar, pavimentar com asfalto, etc.)

Diversos autores publicaram trabalhos destacando a economia que pode ser prevista com a adoção de diferentes técnicas de construção (por exemplo, reciclar o material de um pavimento existente em comparação com os processos convencionais de construção). Aplicar estas abordagens sistematicamente permite determinar o consumo total de energia de todas as atividades da construção, conforme mostrado na tabela na próxima página.

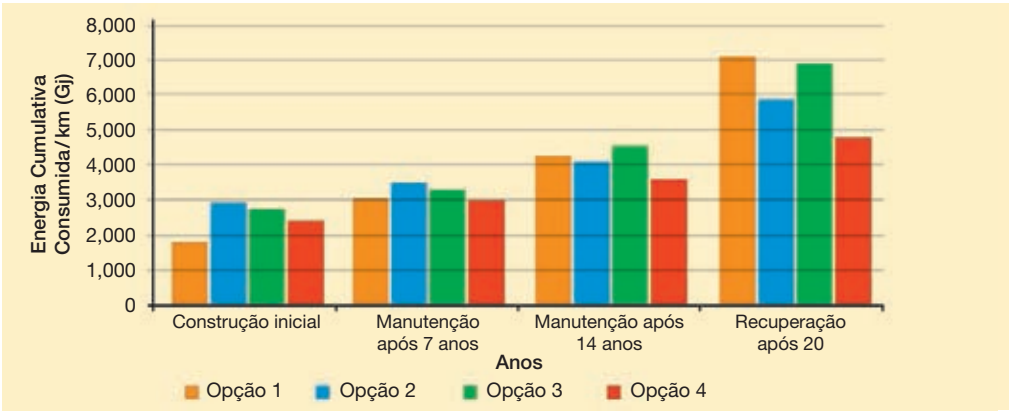
Observação. Existem diversas fontes com dados do consumo de energia para a indústria da construção civil, alguns datados dos anos 70, quando as preocupações com energia surgiram mais popularmente pela primeira vez. Para fins de ilustração, este exemplo utiliza uma fonte que foi recentemente publicada na Nova Zelândia.

Estimativa do consumo de energia para cada opção									
Programação			Recuperação opção # 1		Recuperação opção # 2		Recuperação opção # 3		
Item	Taxa	Unitária (US$)	Remendos / camadas sobrepostas		Fresar e substituir		CTB/GCS/HMA		
			Quantidade	Valor	Quantidade	Valor	Quantidade	Valor	
Fresagem Mistura de ingredientes / Pavimentar	ton ton ton	5 348 320	281 281 281	1.406 97.788 89.920	3.750	18.750			
Triturar GCS e importar									
GCS	ton	50					3.150	157.500	
Reciclar o pavimento existente									
125 GCS 250 BSM 300 CTB	ton ton ton	11 11 11			2.625	28.875	 6.300	 69.300	
Agentes estabilizantes									
Cimento Betume	ton ton	7.000 6.000					158	1.102.500	
Processar & acabar as camadas									
125 GCS 150 GCS 300 CTB 250 BSM	m² m² m² m²	10 10 10 10			10.000	100.000	 10.000 10.000	 100.000 100.000	
30 UTFC									
Ingredientes Misturar / Pavimentar	ton ton	407 320	750 750	305.250 240.000	750 750	305.250 240.000	750 750	305.250 240.000	
HMA									
Ingredientes Misturar / Pavimentar	ton ton	348 320	1.500 1.500	522.000 480.000	3.000 3.000	1.044.000 960.000	875 875	304.500 280.000	
Transportar por 20 km	ton-km	20	2.812	56.245	7.500	150.000	1.625	32.500	
				1.792.609		**2.846.875**		**2.691.550**	

(Quantidades para 1 km de rodovia)						
	Recuperação opção # 4		Intervenção # 1		Intervenção # 2	
	BSM/HMA		UTFC somente		35 mm HMA + UTFC	
	Quanti-dade	Valor	Quanti-dade	Valor	Quanti-dade	Valor
			750	3.750	1.625	8.125
	5.250	57.750				
	53 116	367.500 693.000				
	10.000	100.000				
	750 750	305.250 240.000	750 750	305.250 240.000	750 750	305.250 240.000
	875 875	304.500 280.000			875 875	304.500 280.000
	1.625	32.500	1.500	30.000	3.250	65.000
		2.380.500		**579.000**		**1.202.875**

Energia cumulativa consumida pelas várias atividades da construção (incluindo intervenções de manutenção e recuperação ao final da vida útil) para que as quatro opções possam ser comparadas. Para fins de comparação, estes dados estão resumidos na tabela abaixo e mostrados graficamente na figura a seguir.

Energia cumulativa consumida por quilômetro (em GJ)				
Opção de reabilitação	Construção inicial	Manutenção após 7 anos	Manutenção após 14 anos	Recuperação após 20 anos
Opção 1	1.793	2.996	4.199	7.046
Opção 2	2.847	3.426	4.005	5.798
Opção 3	2.692	3.271	4.474	6.855
Opção 4	2.381	2.960	3.539	4.742



Consumo cumulativo de energia para diferentes opções de recuperação

De forma similar à tendência mostrada no exercício do cálculo de gastos, a figura acima ilustra o benefício real da adoção de uma tecnologia que forneça melhor desempenho ao longo da vida de serviço, com a mudança do quadro da energia consumida durante a construção inicial.

5.2.7 Comentários importantes

As considerações ambientais na engenharia de pavimentação não são mais esotéricas. Ênfase crescente com relação ao impacto ambiental da construção e recuperação de estradas, fez com que dados suficientes fossem disponibilizados para serem utilizados na análise e tomada de decisões. Todos os números do consumo da energia foram utilizados em combinação com custos de toda a vida, em quatro opções realistas de recuperação, utilizadas atualmente em todo o mundo para pavimentos rodoviários.

Isto fornece uma visão para a seleção do projeto, que leva às seguintes conclusões:

- Os custos iniciais da construção por si só são inadequados para optar por uma alternativa de recuperação. Podem fornecer uma visão deformada e não realista da recuperação, o que conduzirá um desperdício de recursos desnecessário.
- A análise de toda a vida utilizando PWoC fornece as necessidades financeiras mais realistas dos gastos com a manutenção do pavimento durante todo o período da análise.
- O consumo de energia e o seu impacto no meio ambiente podem ser previstos. A inclusão de uma avaliação da energia pode influenciar as classificações de diferentes opções de recuperação e, consequentemente, a tomada de decisão.

6 Reciclando material de pavimento asfáltico 100% recuperado (RAP)

6.1	**Material RAP 203**	**203**
6.1.1	Ligante de betume	203
6.1.2	Classificação granulométrica do material RAP	205
6.2	**Usos do material RAP reciclado a frio**	**206**
6.2.1	Material RAP não tratado	206
6.2.2	Material RAP tratado com cimento	207
6.2.3	Material RAP tratado com emulsão betuminosa	207
6.2.4	Material RAP tratado com espuma de asfalto	211

O asfalto é manufaturado utilizando-se os melhores agregados disponíveis e, como estes não se deterioram ao longo da vida de um pavimento, não é surpresa que o RAP é (e isso tem sido por décadas) é um dos materiais mais reciclados no mundo.

O advento das modernas fresadoras que granulam o asfalto in situ aumentou significativamente o valor da recuperação do RAP resultante, tornando-o um material mais útil sem custos extras. Este capítulo enfoca a reutilização do RAP como um material reciclado a frio.

Há duas maneiras de tratar o material RAP como um material reciclado a frio:

- **Tratamento in situ.** O asfalto existente pode ser recuperado e simultaneamente tratado utilizando a tecnologia de reciclagem “cold in-place” (a frio no local) (igualmente referida como “CIR” ou reciclagem em “profundidade parcial”). Este processo utiliza uma grande recicladora montada sobre esteiras para recuperar a parte superior de asfalto no pavimento existente (normalmente entre 100 mm e 150 mm de profundidade de corte) e para misturar simultaneamente o RAP com aditivos. As recicladoras utilizadas para este processo podem normalmente tratar toda a largura de uma pista em uma única passagem (por exemplo a Wirtgen WR 4200 ou CR 2200 equipadas com um tambor de corte/mesa de pavimentação com 3,8 m de largura).
- **Tratamento na usina.** O asfalto fresado é estocado no local e tratado em uma usina misturadora Wirtgen KMA 220. O material RAP tratado é então devolvido ao local e novamente pavimentado nas áreas fresadas. Conhecida como “reciclagem a frio na usina”, esta tecnologia introduz flexibilidade no processo de reciclagem, separando as operações de recuperação e reutilização. Além disso, quando necessário, este processo fornece a oportunidade de britar e/ou peneirar o material RAP, bem como misturá-lo com o agregado novo (por exemplo, brita graduada) antes de o mesmo ser reciclado.

6.1 Material RAP

O termo “RAP” é atribuído a qualquer material asfáltico (100%) (também conhecido como “concreto de asfalto “), recuperado de um pavimento existente. O tipo de asfalto originalmente utilizado em conjunto com variações na mistura asfáltica será consequentemente refletido no material do RAP. Quando camadas múltiplas de asfalto com misturas diferentes são recuperadas pela fresagem (ou trituradas das lajes), o RAP resultante será uma mistura de todas as misturas do componente. As duas características principais de um material RAP são o ligante de betume (o estado, quantidade e a consistência do betume no material) e a granulometria. Igualmente importante é a tendência de partículas maiores do RAP se dividirem ainda mais quando sujeitas às forças da mistura e da compactação.

6.1.1 Ligante de betume

Sob o ponto de vista de uma reciclagem a frio, o mais importante é saber se o betume no material RAP é “ativo ou inativo”. Ou seja, o RAP é um “agregado preto” (inativo) com propriedades similares àquelas da brita graduada ou é um “material pegajoso” (ativo) com a coesão inerente resultante do betume no material RAP? Isto é importante, pois o estado do ligante antigo influenciará significativamente o comportamento do material reciclado quando da sua reutilização.

As seguintes observações indicarão se o material RAP pode ser considerado como inativo:

- Aparência visual: o RAP é de cor cinzenta fosca sem superfícies pretas brilhantes.
- Fragilidade: um pedaço de RAP se rompe de forma limpa em pedaços.
- Adesão: pedaços de RAP (em temperatura ambiente) não grudam na mão quando uma amostra for firmemente apertada.

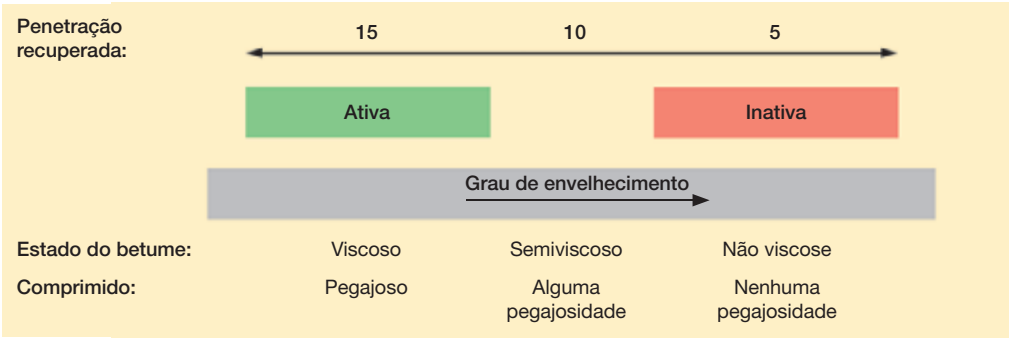
Quando existirem dúvidas se o RAP pode ou não ser classificado como ativo ou inativo, uma amostra representativa pode ser testada em um laboratório para determinar:

- a quantidade de betume no material RAP (percentagem por massa), e
- as propriedades reológicas do betume recuperado (penetração (Pen), ponto de abrandamento e viscosidade).

Os resultados destes testes devem ser usados somente como indicadores, pois, por si só, não dão respostas definitivas; os resultados são influenciados pela competência do operador. O procedimento de extração do betume não necessariamente extrai todo o betume (especialmente aquela quantidade absorvida pelo agregado) e a quantidade de betume determinada pode incluir algum material menor que 0,075 mm (filler). Os valores Pen recuperados são notoriamente variáveis, principalmente devido à influência do solvente utilizado para extrair o betume. Este é um teste “delicado”, que exige presteza por parte do operador caso a repetição dos testes forneça resultados semelhantes.

Apesar destas questões, os dois parâmetros assim determinados fornecem uma diretriz significativa para a classificação de um material RAP.

O valor de Pen indicará a viscosidade do betume recuperado, permitindo que o RAP seja classificado como ativo ou inativo:



O teor de betume do RAP tem pouco significado quando o material for classificado como inativo. Contudo, dependendo do uso pretendido, a quantidade de betume em um material RAP ativo pode ser uma consideração importante. Os vários usos do material RAP reciclado são discutidos abaixo na seção 6.2.

(Uma maneira rápida e fácil de estimar se uma amostra de RAP é ativa ou inativa é aquecer a amostra a 70° C e manufaturar amostras de 100 mm. Saturar as amostras com água por 24 horas antes de realizar os testes de ITS. Se o valor do teste ITS saturado for > 100 kPa, o RAP deve ser considerado como ativo.)

6.1.2 Classificação da mistura RAP

É importante reconhecer que a classificação do material RAP fresado será sempre influenciada pela finalidade da operação de fresagem. Quando um empreiteiro estiver fresando com a única finalidade de remover o asfalto da rodovia, o seu foco será a produção, pelo custo mais baixo possível, e não o nivelamento do material RAP. Contudo, quando o material do asfalto for 100% reciclado in situ, a atenção será inteiramente diferente, pois a granulometria do RAP fresado será de importância crucial.

A granulometria do material RAP fresado é influenciada pela condição do asfalto in situ e da operação de fresagem. Os principais fatores que influenciam a classificação do RAP são:

- a composição e a uniformidade do material asfáltico existente
- a condição do material asfáltico existente
- a temperatura do asfalto no horizonte fresado
- a profundidade da fresagem
- a velocidade de avanço da fresadora
- a velocidade de rotação do tambor de fresagem
- o tipo de tambor de fresagem e a condição das ferramentas de fresagem
- o sentido do corte (para cima ou para baixo)

6.2 Usos do material RAP reciclado a frio

O material RAP não tratado pode ser utilizado como substituto do material convencional para construir uma nova camada de pavimentação. Contudo, sempre se deve ter em mente que o material RAP deriva de agregados de boa qualidade e, consequentemente, é um material valioso que não deve ser desperdiçado onde tal qualidade não for garantida. Ao invés disso, deve ser guardado e utilizado como substituto (tratado se necessário) onde os materiais convencionais de pavimentação forem caros e/ou escassos. Além disso, quando tratado com um aditivo apropriado (por exemplo, betume), o RAP pode ser usado como um material superior para construir as camadas superiores dos pavimentos que suportam cargas pesadas.

As seguintes seções discutem as opções disponíveis para usar o RAP como um material reciclado a frio.

6.2.1 Material RAP não tratado

Para estradas com trânsito mais pesado, somente RAP inativo deve ser usado como um substituto para a brita graduada em uma camada de base. Tal camada de material RAP é construída com os mesmos procedimentos e atendendo às mesmas exigências de densidade que aquelas aplicáveis às bases de brita convencionais.

Devido à viscosidade do betume residual, material RAP classificado como ativo possui níveis mais elevados de coesão do que o RAP inativo ou o material natural.

Tal coesão resistirá ao esforço da compactação e limitará a densidade obtida durante a construção. Entretanto, sob a ação dinâmica das cargas de tráfego aplicadas, o material consolidará lentamente. Para conter esta tendência, material RAP classificado como ativo deve sempre ser misturado com 30% nominais (pelo volume) de brita graduada para alcançar um status de inativo.

6.2.2 Material RAP tratado com cimento

Uma das alternativas para tratar material RAP é a estabilização com cimento. Isto é normalmente utilizado com a finalidade de construir uma camada semirrígida no pavimento que então é coberto com camadas adicionais (geralmente asfalto).

Para determinar a quantidade de adição do cimento necessária para se obter as propriedades exigidas, um "projeto de mistura de estabilização com cimento" convencional deve sempre ser concebido (conforme descrito na Seção 4.2).

Contudo, o RAP é invariavelmente um material da alta qualidade que pode ser reutilizado de forma mais eficaz quando tratado com betume (por exemplo, emulsão betuminosa ou espuma de asfalto) para tirar vantagem:

- das propriedades adesivas do betume existente no RAP, o que oferece uma coesão melhorada; e
- da viscosidade e da flexibilidade do betume no RAP.

6.2.3 Material RAP tratado com emulsão betuminosa

Quando tratamos material RAP com emulsão betuminosa, o volume aumentado do betume emulsionado tenderá a revestir as partículas individuais do RAP. Isto pode conduzir a uma ligação contínua, tornando a mistura asfáltica (isto é, um material asfáltico com mistura a frio). O comportamento esperado do material RAP tratado será influenciado pelos seguintes:

- Quando o valor Pen do betume recuperado do RAP classificar o material como ativo (valor Pen > 10), o material tratado pode ser considerado como asfáltico.
- Onde o teor de betume do material RAP exceder 5%, o material tratado terá tendências mais asfálticas.
- Onde o teor residual de betume da emulsão adicionada ao material RAP exceder 2%, então se pode esperar um comportamento asfáltico.

Quando duas das três condições acima forem atendidas, tratar com emulsão betuminosa criará um material asfáltico e um projeto de mistura tipo asfalto deve ser concebido (normalmente um projeto Marshall ou uma análise volumétrica da mistura para verificar o teor do ligante do projeto). Além disso, um produto tipo asfalto pode ser obtido adicionando-se uma emulsão com um agente rejuvenescedor, especialmente quando o valor Pen do betume recuperado do material RAP for > 15.

Quando o material RAP não se enquadrar nesta categoria, o tratamento com emulsão betuminosa terá mais probabilidades de produzir um material estabilizado ligado não continuamente (emulsão de BSM-) do que um asfalto misturado a frio. Um projeto da mistura sempre deve ser realizado após o procedimento padrão descrito no Capítulo 4 e no Apêndice 1. A tabela abaixo resume a seleção do método do projeto de mistura.

Diretriz para a seleção de um método de concepção da mistura ao tratar RAP com emulsão

Fatores que influenciam	Comportamento do material	
	Tipo estabilizado	Tipo de asfalto
1. RAP: Penetração recuperada	< 10	> 10
2. RAP: Betume recuperado (%)	< 5%	> 5%
3. Amostras ITS_{WET} manufaturadas a 70° C (kPa)	< 100	> 100
4. Emulsão: Betume residual	< 2%	> 2%
5. Agente rejuvenescedor	Não	Sim
Método do projeto da mistura	**Apêndice 1**	**Marshall**

As emulsões betuminosas normalmente são especialmente formuladas para tratar material 100% RAP. Estes podem incluir betume de base que se desvia do grau padrão Pen de 80/100, normalmente utilizado para manufaturar emulsões e podem incorporar tanto betume mais rígido ou mais macio. A escolha do tipo correto de emulsão betuminosa para cada aplicação é essencial, conforme indicado abaixo.

Em todo o mundo, o meio para retardar (grau estável) as emulsões betuminosas catiônicas é quase que exclusivamente utilizado para tratar material RAP. Os principais fatores que influenciam a formulação de uma emulsão betuminosa específica são:

- Tempo de quebra. O tempo que o betume leva para romper a suspensão pode ser controlado através da interação química entre a emulsão e o agregado.
- Adição de cimento. Um pequeno percentual de cimento é, frequentemente, adicionado para "desestabilizar" a emulsão e acionar a quebra.
- Revestimento de partículas de agregado. Isto é normalmente avaliado visualmente e fornece uma indicação básica de que a formulação está correta.
- Coesão da mistura. Isso é influenciado pela interação entre a emulsão e o betume envelhecido sobre o agregado, que algumas vezes necessita da inclusão de um agente rejuvenescedor.

Um produto de asfalto misturado a frio normalmente é apropriado quando a deterioração estiver restrita ao topo do pavimento e a espessura do asfalto for suficiente para permitir que uma camada fina (< 150 mm) de asfalto seja reciclada in situ. De forma similar a HMA, o desempenho de um material RAP tipo asfáltico tratado com emulsão betuminosa é sensível a mudanças na granulometria. Por esta razão, é imperativo realizar um projeto representativo da mistura e identificar seções uniformes do asfalto que será reciclado in situ. As observações visuais e resultados dos testes dos núcleos extraídos são frequentemente utilizados para identificar tais seções. Contudo, informações mais confiáveis podem ser obtidas pela avaliação da granulometria e condições do RAP fresado gerado da fresagem experimental em vários locais ao longo da rodovia.

Quando uma granulometria compatível não puder ser garantida, o asfalto deverá ser fresado, empilhado e peneirado antes de ser tratado em uma usina estacionária. Sempre que necessário, partículas de RAP com dimensões excessivas podem ser britadas e peneiradas.

3800 CR: Reciclagem completa de pistas in situ.

WR 4200: Reciclagem total de pistas in situ.

KMA 220: Garantindo a consistência no material RAP pelo peneiramento prévio.

As seguintes considerações especiais devem ser observadas para projetos de mistura de material RAP tratada com emulsão betuminosa:

- Projeto da mistura de BSM adicional. Vários países possuem suas próprias diretrizes para os limites de Estabilidade e Fluxo de misturas recicladas a frio que diferem dos limites de HMA. (Não é incomum obter valores altos de Estabilidade para tais misturas recicladas a frio.) O Manual Básico de Reciclagem de Asfalto publicado nos EUA pela Associação de Reciclagem e Recuperação de Asfalto (ARRA) fornece uma orientação útil com relação aos valores apropriados para estes materiais.
- Projeto da Mistura de Estabilização. Conforme mostrado na tabela incluída na página anterior, onde a granulometria do material RAP é relativamente fina, e o valor Pen do betume recuperado ultrapassa 10, altos valores ITS_{dry} podem ser gerados, algumas vezes superiores a 500 kPa. É por esta razão que um valor mínimo de ITS_{wet} de 100 kPa foi adotado ao invés de um valor percentual de TSR, que seria desnecessariamente oneroso. Contudo, a combinação de valores altos de ITS_{Dry}/baixos de TSR pode ser utilizada como um indicativo de que o processo de tratamento não é de puramente estabilização, mas tende a uma liga mais continua (material asfáltico). Isto, por sua vez, é um aviso de que a mistura do material RAP com 15% nominais de pó britado (por volume), se um material estabilizado não ligado continuamente é necessária.

6.2.4 Material RAP tratado com espuma de asfalto

A espuma de asfalto é um agente estabilizante. O betume adicionado a um material RAP em um estado de espuma se dispersa como pequenas "lascas" de betume que não revestem as partículas de RAP com uma película de betume fresco. A razão para a adição de espuma de asfalto não é rejuvenescer o betume antigo no material RAP (para produzir um produto asfáltico), mas para obter um material estabilizado com betume (BSM) com suas próprias características e vantagens.

De uma perspectiva de espuma de BSM, tratar um material RAP é diferente de tratar todos os outros materiais devido à presença de betume envelhecido.

Considerando que material não RAP demanda a presença de uma quantidade mínima de poeira (>4% por massa < 0,075 mm) para que o betume se disperse efetivamente, o material RAP com somente 1%, que passar em uma peneira de 0,075 mm, pode ser tratado com sucesso com espuma de asfalto. Entende-se que isso se deve a lascas individuais de betume com energia quente suficiente para aquecer e aderir (como pontos) ao betume envelhecido no RAP.

Como o material RAP pode ser classificado como inativo, o tratamento com espuma de asfalto produzirá um material estabilizado com betume ligado não continuamente. Se o material RAP for classificado como ativo, então alguma aderência entre as partículas individuais de RAP que revestem o betume antigo é provável, o que resultará em um material com ligação mais contínua, que não é asfáltico nem estabilizado. Por esta razão, o material classificado como RAP ativo deve ser misturado com 30% nominais (por volume) de brita graduada (normalmente com um tamanho máximo de 20 mm), para evitar a aderência entre as partículas, resultante da "pegajosidade" do betume antigo.

No entanto, independentemente da natureza aparente do material RAP e do fato desse parecer ou não similar àquele tratado previamente, um projeto de mistura deve ser sempre realizado em amostras representativas, para determinar as características do produto tratado. Em particular, os resultados de testes ITS (amostras com 100 mm de diâmetro descritas no Apêndice 1) devem ser cuidadosamente verificados para fornecer os melhores indicadores do comportamento do material. Conforme discutido na Seção 4.3.11, valores ITS_{DRY} superiores a 500 kPa são uma indicação de comportamento asfáltico, sugerindo que a mistura com brita graduada (ou pé de britadeira) é necessária para garantir a obtenção de um produto estabilizado ligado não continuamente.

Assim como ocorre com todos os materiais de espuma de BSM (descritos no Capítulo 4), a demanda do betume por uma estabilização efetiva é uma função da granulometria do material originário. Materiais RAP tendem a ser graúdos e, consequentemente, demandam uma aplicação relativamente baixa de espuma de asfalto para uma estabilização eficiente, normalmente na faixa de 1,6% a 2,2% (por massa).

Climas quentes. Quando a fundação de base de um pavimento com demanda pesada em um clima quente for construída com material RAP tratado com espuma de asfalto, os seguintes aspectos necessitam de atenção:

- as propriedades de cisalhamento da mistura devem ser determinadas a partir dos testes triaxiais realizados sob temperaturas representativas;
- a massa do eixo de veículos pesados deve ser controlada. A sobrecarga gerará tensões desproporcionalmente altas na base, o que podem resultar em uma deformação acelerada; e
- como um seguro contra a perda de coesão e/ou uma tendência de uma ligação permanente, todas as misturas devem ser misturadas com material virgem (15% nominais de poeira de britadeira para RAP inativo ou 30% de brita graduada para material RAP ativo (ambos por volume)).

Finalmente, materiais RAP estabilizados com espuma de asfalto comprovaram ser excepcionalmente bem sucedidos em numerosos projetos em todo o mundo, desde que corretamente projetados e construídos, e podem ser utilizados com confiança como um substituto para as bases de asfalto.

Bibliografia

- AASHTO. Guide for the Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 1993.

- American Concrete Pavement Association. Pavement Analysis Software, baseado no Guia AASHTO de 1993 para Projetos de Estruturas de Pavimentos. Washington D.C. 1993.

- A guide to the structural design of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical countries. 1993. 4ª Edição. Crowthorne, Berkshire: Transport Research Laboratory (TRL). (Rodovias estrangeiras, nota 31).

- Basic Asphalt Recycling Manual. Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA). Annapolis, Maryland, EUA. 2001

- Bonfim V. Cold Milling of Asphalt Pavements. Publicado por Suiang G, Oliveira, versão inglesa por Priscila Podboi Adachi & Patricia Pick, São Paulo, Brasil, 2008

- Bredenhann SJ and Jenkins KJ. Determination of Stress-Dependent Material Properties with the FWD, for use in the Structural Analysis of Pavements using Finite Element Analysis Techniques. Conferência sobre Pavimentos Asfálticos para a CAPSA '04, Sun City, África do Sul, setembro de 2004.

- Claessen, A.I.M, and Ditmarch, R. Pavement evaluation and overlay design. The Shell Method. Proceedings of the Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Vol.1, Ann Arbor, 1977.

- Collings D.C., and Jenkins K.J., The long term behaviour of bitumen stabilised materials. 10ª Conferência sobre Pavimentos Asfálticos na África do Sul, CAPSA 2011, Drakensberg, África do Sul.

- Collings D.C. and Jenkins K.J., Whole-of-Life Analysis of Different Pavements: The Real Picture. Primeira Conferência Internacional sobre Preser--vação de Pavimentos, Newport Beach, Califórnia, abril de 2010.

- Committee of State Road Authorities (CSRA), Guidelines for road construction materials. Pretoria Committee of State Road Authorities Department of Transport (DoT). (DoT technical recommendations for highways; draft TRH14). 1985

- De Beer, M. 1990. Aspects of the design and behaviour of road structures incorporating lightly cementitious layers. Dissertação de Doutorado, Universidade de Pretoria, Pretoria.

- De Beer, M. 1991. Use of the Dynamic Cone Pene--trometer (DCP) in the design of road structures. In: Proceedings of the Regional conference for Africa on soil mechanics and foundation engineering; 10ª Conferência Internacional sobre solos tropicais e residuais, Maseru, 3 de setembro de 1991.

- Ebels LJ, and Jenkins KJ. Characterisation of Bitumen Stabilised Granular Pavement Material Properties using Triaxial Testing. Conferência Internacional sobre a Caracterização Avançada de Pavimentos e Materiais de Engenharia de Solos, ICACPSEM, Atenas, Grécia, junho de 2007.

- Flexible pavement rehabilitation investigation and design. Pretoria: Comitê das Autoridades Rodoviárias do Estado (CSRA), Departamento de Transportes (DoT). (Recomendações técnicas do Departamento de Transportes para autoestradas; versão TRH12, África do Sul, 1996.

- Horak, E. Aspects of deflection basin parameters used in mechanistic rehabilitation design procedures for flexible pavement in South Africa. Tese

de Doutorado, Universidade de Pretoria, Pretoria, 1988.

- Relatório Provisório - Construction completion for cold-in-place recycling, Placer 80 PM 14.3 / 33.3, Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans), Materiais da Região Norte, Marysville, Califórnia, agosto de 2006.

- Jenkins, K.J. Analysis of a Pavement Layer which has been treated by Single Pass In Situ Stabilisation, Tese de Mestrado, Universidade de Natal, África do Sul, 1994.

- Jenkins, K.J. Mix Design Considerations for Cold and Half-warm Bituminous Mixes with emphasis on Foamed Bitumen. Dissertação de doutorado, Universidade de Stellenbosch, África do Sul, 2000.

- Jenkins K.J. and Van de Ven M.F.C. Comparisons between In Situ Recycling with Cement and Foamed Bitumen or Emulsion on Vanguard Drive in South Africa. Primeiro Simpósio Internacional sobre Estabilização de Subleitos e Reciclagem de Pavimentos In Situ utilizando Cimento, Salamanca, Espanha, 2001.

- Jenkins KJ, Van de Ven MFC, Molenaar AAA and de Groot JLA, Performance Prediction of Cold Foamed Bitumen Mixes. Nona Conferência Internacional de Pavimentos Asfálticos, Copenhage, Dinamarca, 2002.

- Jenkins K.J. Collings D.C. e Jooste F.J. TG2: The Design and Use of Foamed Bitumen Treated Materials. Shortcomings and Imminent Revisions. Conferência sobre Reciclagem e Estabilização, NZIHT, Auckland, Nova Zelândia, junho de 2008.

- Jooste, J.P. The measurement of deflection and curvature of road surfaces. CSIR Manual K16, National Institute for Road Research, CSIR, Pretoria, 1970.

- Jordaan, G.J. Towards improved procedures for the mechanistic analysis of cement-treated layers in pavements. Anais da 7ª Conferência Internacional sobre Pavimentos Asfálticos, Nottingham, Inglaterra, 1992.

- Jordaan, G.J. Pavement rehabilitation design based on pavement layer component tests (CBR and DCP). Relatório de Pesquisa 91/241, Departamento de Transportes, Pretoria, 1994.

- Kleyn, E.G. and Savage, P.F. The application of the pavement DCP to determine the bearing properties and performance of road pavements. Anais do Simpósio Internacional sobre a Capacidade de Sustentação de Rodovias e Pistas de Aeroportos. Trondheim, Noruega, 1982.

- Loizos, A. and Papavasiliou, V. In situ Characterization of Pavement Materials Stabilised with Foamed Asphalt and Cement. Conferência Internacional sobre Caracterização Avançada de Materiais de Pavimentos e Engenharia de Solos, ICACPSEM 2007, Atenas, Grécia.

- Long, F,M. and Jooste, F.J. Summary of LTPP Emulsion and Foamed Bitumen Treated Sections. Memorando técnico compilado em nome de SABITA e GDPTRW. Modelling and Analysis Systems, Cullinan, África do Sul. (Relatório Gautrans: CSIR/BE/ER/2007/0006/B)

- Long, F.M. and Jooste, F.J. A Materials Classification and Knowledge Based Structural Design Method for Pavements with Bituminous Stabilised Materials. Conferência sobre Pavimentos Asfálticos na África do Sul, CAPSA 2007, Gaberone, X 2007

- Long F.M. Validation of Material Classification System and Pavement Number Method. Memorando Técnico. Modelling and Analysis Systems, Cullinan. Departamento de Transporte Público, Rodovias e

Obras de Sabita/Gauteng, relatório GDPTRW no. CSIR / BE / IE / ER /2009 / 0028 / C. Pretória 2009

- Mathaniya ET, Jenkins KJ, and Ebels LJ. Characterisation of Fatigue Performance of Selected Cold Bituminous Mixes. Conferência Internacional sobre Pavimentos Asfálticos, ICAP, Quebec, Canadá, agosto de 2006.

- Mulusa W.K., and Jenkins K.J., Characterization of Cold Recycling Mixes using a Simple Triaxial Test. 6ª Conferência Internacional de Manutenção e Recuperação de Pavimentos e Controle Tecnológico. Turim, Itália, julho de 2009.

- Paige-Green, P., Netterberg F. and Sampson L. The carbonation of chemically stabilised road construction materials: Guide to its avoidance. Relatório do Projeto PR 89/146/1. Conselho de Pesquisa Científica e Industrial; CSIR Transportek, África do Sul, 1990.

- Paige-Green P. and Ventura D. Durability of Foamed Bitumen Treated Basalt Base Courses. Conselho de Pesquisa Científica e Industrial, Divisão Transportek. Relatório de contrato: CR-2004 /08, Pretória, África do Sul. 2004

- Patrick, J. and Moorthy, H. Quantifying the Benefits of Waste Minimisation in Road Construction. Conferência de Reciclagem e Estabilização, Instituto de Tecnologia para Autoestradas da Nova Zelândia, junho de 2008, Takapuna Beach, Auckland, Nova Zelândia.

- Technical Guidelines TG2, Second Edition, Bitumen Stabilised Materials. A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials. ISBN 978-0-7988-5582-2, Academina do Asfalto, Pretória, África do Sul, maio de 2009.

Observação: Esta publicação está disponível para download gratuito no website da Asphalt Academy: www.asphaltacademy.co.za

- Twagira E.M., and Jenkins K.J., Age Hardening Behaviour of Bituminous Stabilised Materials. 7º Simpósio Internacional RILEM, ATCBM09. Rodes, Grécia, maio de 2009.

- Twagira E.M., and Jenkins K.J., Moisture Damage of Bituminous Stabilised Materials using a MIST Device. 7º Simpósio Internacional RILEM ATCBM09. Rodes, Grécia, maio de 2009.

- Theyse, H.L., De Beer, M. & Rust, F.C. 1996. Overview of the South African mechanistic design analysis method. No: 75º Encontro do Conselho de Pesquisa sobre Transportes (TRB). 07-11 de janeiro, 1996.

- van Niekerk, A.A. and Hurman, M. Establishing Complex Behaviour of Unbound Road Building Materials from Simple Material Testing, Relatório: Universidade Delft de Tecnologia, Países Baixos, 1995.

- van Niekerk, A.A., van Scheers, J., and Galjaard, PJ. Resilient Deformation Behaviour of Coarse Grained Mix Granulate Base Course Materials from Testing Scaled Gradings at Smaller Specimen Sizes. Conferência UNBAR 5, Universidade de Nottingham, 2000.

- van Niekerk, A.A., Mechanical Behaviour and Performance of Granular Bases and Sub-bases in Pavements. Tese de Doutorado. Universidade Delft de Tecnologia, Países Baixos. 2001.

Apêndice 1 - Procedimentos laboratoriais para materiais estabilizados

A1.1	Procedimento do projeto de mistura para materiais estabilizados com cimento	223
A1.1.1	Amostragem e preparação	223
A1.1.1.1	Amostragem em campo	223
A1.1.1.2	Testes padrão do solo	223
A1.1.1.3	Mistura da amostra	224
A1.1.1.4	Granulometria (análise da peneira)	225
A1.1.1.5	Proporção adequada representativa	226
A1.1.1.6	Teor de umidade higroscópica	227
A1.1.1.7	Quantidades de amostras	228
A1.1.2	Determinação da relação de umidade / densidade do material tratado	228
A1.1.3	Manufatura de espécimes para teste	229
A1.1.4	Cura dos espécimes	232
A1.1.4.1	Cura padrão	232
A1.1.4.2	Cura acelerada	232
A1.1.5	Testes de resistência	232
A1.1.5.1	Teste de resistência à compressão não confinada (UCS)	232
A1.1.5.2	Teste de resistência à tensão indireta (ITS)	234
A1.1.6	Determinação da aplicação exigida do agente estabilizante	236
A1.2	Procedimento do projeto estabilização com espuma de asfalto	237
A1.2.1	Amostragem e preparação	238
A1.2.1.1	Amostragem em campo	238

A1.2.1.2	Testes padrão do solo	238
A1.2.1.3	Mistura da amostra	239
A1.2.1.4	Granulometria (análise da peneira)	240
A1.2.1.5	Proporção adequada representativa	242
A1.2.1.6	Teor de umidade higroscópica	243
A1.2.1.7	Quantidades de amostras	243
A1.2.2	Requisitos do filler ativo	244
A1.2.2.1	Efeito da plasticidade	244
A1.2.2.2	Determinação dos requisitos do filler ativo	245
A1.2.3	Determinação das propriedades para produzir espuma de asfalto	246
A1.2.4	Tratando a amostra com espuma de asfalto	249
A1.2.5	Manufatura de amostras para teste	254
A1.2.5.1	Manufatura de amostras de 100 mm de diâmetro	254
A1.2.5.2	Manufatura de amostras de 150 mm de diâmetro	256
A1.2.6	Cura das amostras	257
A1.2.6.1	Cura a seco	257
A1.2.6.2	Cura para simular condições do local	257
A1.2.7	Preparando os espécimes para teste	258
A1.2.8	Determinação da resistência à tensão indireta (ITS) das amostras	259
A1.2.9	Interpretação dos resultados dos testes de resistência à tensão indireta (ITS)	262
Anexo A1.2.1: Planilha do projeto de mistura de espuma de asfalto		266
Anexo A1.2.2: Relatório do projeto de mistura de espuma de asfalto		267

A1.3	Procedimento do projeto estabilização emulsão betuminosa	268
A1.3.1	Amostragem e preparação	268
A1.3.1.1	Amostragem em campo	268
A1.3.1.2	Testes padrão do solo	269
A1.3.1.3	Mistura da amostra	269
A1.3.1.4	Granulometria (análise da peneira)	271
A1.3.1.5	Proporção adequada representativa	273
A1.3.1.6	Teor de umidade higroscópica	274
A1.3.1.7	Quantidades de amostras	274
A1.3.2	Requisitos do filler ativo	275
A1.3.2.1	Efeito da plasticidade	275
A1.3.2.2	Determinação dos requisitos do filler ativo	276
A1.3.3	Determinação da relação fluído / densidade	277
A1.3.4	Tratando a amostra com emulsão betuminosa	278
A1.3.5	Manufatura de amostras para teste	281
A1.3.5.1	Manufatura de amostras de 100 mm de diâmetro	281
A1.3.5.2	Manufatura de amostras de 150 mm de diâmetro	283
A1.3.6	Cura das amostras	284
A1.3.6.1	Cura a seco	284
A1.3.6.2	Cura para simular condições do local	284
A1.3.7	Preparando os espécimes para teste	285
A1.3.8	Determinação da resistência à tensão indireta (ITS) das amostras	286
A1.3.9	Interpretação dos resultados dos testes de resistência à tensão indireta (ITS)	289

Anexo A1.3.1: Planilha do projeto de mistura de espuma de asfalto		291
Anexo A1.3.2: Relatório do projeto de mistura de emulsão betuminosa		292
A1.4	**Amostras do campo de testes de materiais estabilizados com betume (BSMs)**	**293**
A1.4.1	Amostragem em campo	293
A1.4.2	Preparação da amostra	293
A1.4.3	Ajustar o teor de umidade	293
A1.4.3.1	Quando a Densidade Máxima Seca (MDD) e o Teor Ideal de Umidade (MAC) do material forem conhecidos com certeza	294
A1.4.3.2	Quando a Densidade Máxima Seca (MDD) e o Teor Ideal de Umidade (MAC) do material não forem conhecidos	294
A1.4.4	Manufaturar amostras de 100 mm de diâmetro para teste	296
A1.4.5	Curar as amostras	296
A1.4.6	Determinação da Resistência à Tensão Indireta (ITS)	297
A1.5	**Determinando a resistência de amostras do núcleo do BSM**	**300**
A1.5.1	Extraindo as amostras do núcleo	300
A1.5.2	Cortando as amostras do núcleo	300
A1.5.3	Curando as amostras do núcleo	300
A1.5.4	Determinação da densidade da massa	301
A1.5.5	Determinação da Resistência à Tensão Indireta (ITS)	301
A1.6	**Requisitos dos equipamentos laboratoriais**	**302**
A1.6.1	Equipamento laboratorial para testes de solos	302
A1.6.2	Equipamento laboratorial adicional para estabilização de cimento (ou cal)	303
A1.6.3	Equipamento laboratorial adicional para estabilização betume	304

Este apêndice inclui os procedimentos detalhados para a execução de projetos de misturas para estabilização em um laboratório. Três procedimentos de concepção das misturas são descritos:

Seção A1.1:	Estabilização de cimento (aplicável também à estabilização com cal hidratada)
Seção A1.2:	Estabilização de betume utilizando espuma de asfalto
Seção A1.3:	Estabilização de betume utilizando emulsão betuminosa

Cada secção contém todas as etapas e descrições necessárias para a execução do projeto de mistura pertinente, incluindo a preparação de amostras, manufatura de espécimes, e procedimentos de cura e teste. Além disso, todas as formulas necessárias para cada projeto de mistura estão incluídas na seção pertinente, eliminando assim a necessidade de procurar por mais informações. Além disso, para tornar estes procedimentos amigáveis ao usuário e uma fonte de informações verdadeiramente “one-stop”, uma explicação é fornecida ao final de cada seção para interpretar os vários resultados de testes.

Duas seções sobre testes de controle de qualidade de BSMs estão incluídas:

Seção A1.4:	Teste de amostras de campo de material estabilizado com betume (BSMs)
Seção A1.5:	Determinação da resistência de amostras de núcleo de BSM

Finalmente, a Seção A1.6 inclui listas abrangentes de equipamentos de laboratório para:

Seção A1.6.1	Testes de solos (equipamento básico de laboratório para todos os tipos de estabilização)
Seção A1.6.2	Itens adicionais para estabilização de cimento (ou cal)
Seção A1.6.3	Itens adicionais para estabilização de betume

A1.1 Procedimento do projeto de mistura para materiais estabilizados com cimento

A1.1.1 Amostragem e preparação

A1.1.1.1 Amostragem em campo

Amostras em grande quantidade são obtidas de poços de teste escavados como parte das pesquisas de campo (ou de poços emprestados ou pedreiras onde os materiais frescos devem ser importados e estabilizados). Cada camada do pavimento superior (± 300 mm) deve ser amostrada em separado e, no mínimo, 100 kg de material recuperado de cada camada, susceptível de ser incluído em qualquer operação de reciclagem e, por conseguinte, exigirá um projeto de mistura.

Observação:

- As amostras retiradas de camadas de material ligado (asfalto e materiais previamente estabilizados) devem ser pulverizadas in situ utilizando uma pequena fresadora (ou uma recicladora) para simular a granulometria que será obtida quando o pavimento for reciclado.

A1.1.1.2 Testes padrão do solo

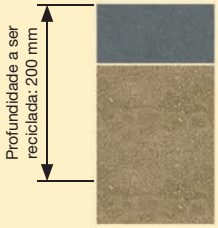
Realize os seguintes testes padrão do material amostrado de cada camada individual ou fonte:

- Análise de peneira para determinar a granulometria (procedimento de lavagem de finos, ASTM D 422);
- Limites de Atterberg para determinar o índice de plasticidade (ASTM D 4318); e
- Relação umidade / densidade (AASHTO T-180).

A1.1.1.3 Mistura da amostra

Se necessário, misture os materiais das amostras de diferentes camadas (e/ou material novo) para obter uma amostra combinada que represente o material de toda a profundidade da reciclagem. A densidade in situ dos vários materiais componentes deve ser considerada quando se misturam materiais, conforme ilustrado no exemplo mostrado abaixo.

Estrutura do pavimento superior existente



60 mm Asfalto
(densidade in situ 2.300 kg/m³)

250 mm de brita graduada (CGS)
(densidade in situ 2.000 kg/m³)

Misture os materiais proporcionalmente à espessura da camada e à densidade in situ, conforme segue:

Material	Massa/m² (kg)	Proporção por massa (%)	Por amostra de 10 kg (g)
Asfalto (60 mm em 2.300 kg/m³)	0,06 x 2.300 = 138	138/418 = 0,33	0,33 x 10.000 = 3.300
GCS (140 mm em 2,000 kg/m³)	0,14 x 2.000 = 280	280/418 = 0,67	0,67 x 10.000 = 6.700
Total	418	1,00	10.000

Observação:

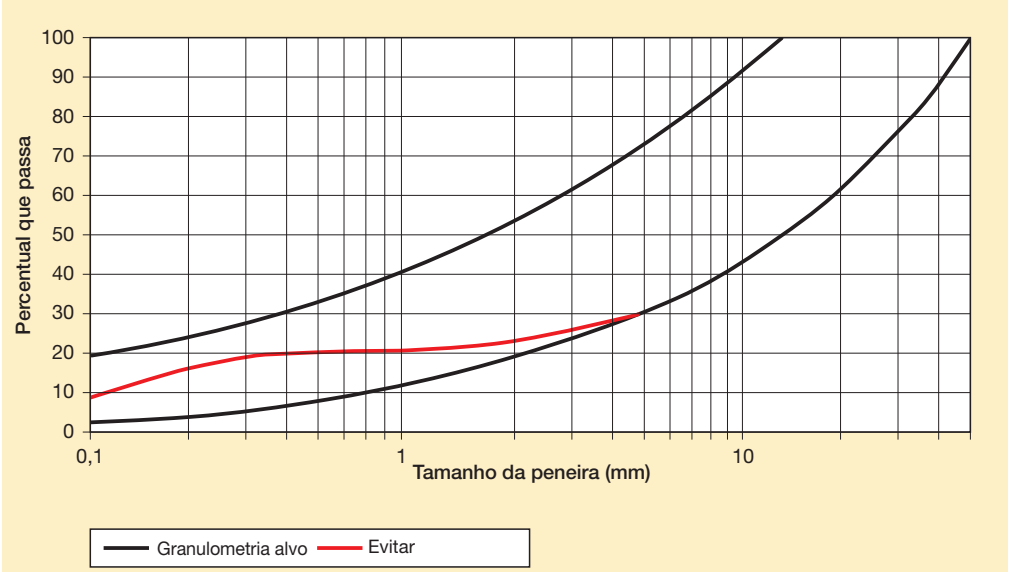
- Repita os testes padrão de solo listados acima para determinar o nivelamento, o índice de plasticidade e a relação umidade / densidade da amostra misturada.

A1.1.1.4 Granulometria (análise de peneira)

Faça um gráfico da curva de granulometria da amostra que será utilizada nos projetos da mistura. Inclua no gráfico as “Granulometrias recomendadas” da tabela abaixo. Este gráfico indicará se é necessária uma mistura adicional com material novo importado. Entretanto, se o gráfico incluir uma “proeminência” nas frações entre as peneiras de 0,075 mm e de 2 mm (conforme mostrado na linha vermelha “Evitar” no gráfico abaixo), deve-se avaliar misturar a amostra com material fino suficiente (por exemplo: 10% por volume de poeira da britadeira de menos de 5 mm) para reduzir a magnitude da proeminência.

Observação:

- Este exercício é aconselhável pois permite uma indicação preliminar da resistência que pode ser esperada depois de o material ser tratado com cimento. (Um material com granulometria insuficiente é difícil de compactar e, consequentemente, a baixa densidade afetará significativamente a resistência do material estabilizado.)



Curvas de classificação granulométrica recomendadas

Tamanho da peneira (mm)	Tamanhos recomendados das partículas	
	Percentual passante (%)	
	Grossa	Fina
50	100	100
37,5	85	100
26,5	72	100
19	60	100
13,2	50	100
9,5	42	90
6,7	35	80
4,75	30	72
2,36	21	56
1,18	14	44
0,6	9	35
0,425	7	31
0,3	5	27
0,15	3	21
0,075	2	18

A1.1.1.5 Proporção adequada representativa

Separar o material na amostra preparada nas seguintes quatro frações:

i. Retido na peneira de 19,0 mm;
ii. Passa na peneira de 19,0 mm, mas fica retido na peneira de 13,2 mm;
iii. Passa na peneira de 13,2 mm, mas fica retido na peneira de 4,75 mm; e
iv. Passa na peneira de 4,75 mm.

Reconstitua as amostras representativas de acordo com o tamanho da partícula determinado acima (para o exemplo do material grosso) para a porção que passa pela peneira de 19,0 mm. Substitua a porção retida na peneira de 19,0 mm por material que passa pela peneira de 19,0 mm e fica retido na peneira de 13,2. O exemplo na tabela abaixo explica o procedimento:

Análise da peneira		Quantidade de material a ser incluído na amostra de 10 kg		
Tamanho da peneira (mm)	Percentual que passa (resultado da análise da peneira da amostra a granel)	Passa em 4,75 mm	Passa em 13,2 mm, e retido em 4,75 mm	Passa em 19,0 mm, e retido em 13,2 mm
19,0	90,5	(53,6/100 x 10.000) = 5.360 g	((72,3-53,6)/100 x 10.000) = 1.870 g	((100-72,3)/100 x 10.000) = 2.770 g
13,2	72,3			
4,75	53,6			

Se material insuficiente passar na peneira de 19,0 mm, mas ficar retido na peneira de 13,2 mm, para substituir aquele retido na peneira de 19,0 mm, triture levemente o material retido na peneira de 19,0 mm para fornecer mais desta fração.

A1.1.1.6 Teor de umidade higroscópica

Duas amostras representativas secas com ar, sendo cada um com aproximadamente 1 kg, são utilizadas para determinar o teor de umidade higroscópica (secas com ar) do material. (Observação: Um tamanho de amostra maior deve ser utilizado para materiais com uma classificação mais graúda.) Pese as amostras secas com ar, o mais precisamente próximo a 0,1 g e então as coloque em um forno com uma temperatura entre 105° C e 110° C até as mesmas alcançarem uma massa constante. O teor de umidade higroscópica ($W_{air\text{-}dry}$) é a perda de massa expressa como um percentual da massa seca da amostra. Determine a umidade higroscópica utilizando a Equação A1.1.1.

$$W_{air\text{-}dry} = \frac{(M_{air\text{-}dry} - M_{dry})}{M_{dry}} \times 100 \qquad \text{[equação A1.1.1]}$$

onde:

$W_{air\text{-}dry}$ = teor de umidade higroscópica [% por massa]
$M_{air\text{-}dry}$ = massa de material seco a ar [g]
M_{dry} = massa de material seco em forno [g]

A1.1.1.7 Quantidades de amostras

As diretrizes mostradas na seguinte tabela devem ser utilizadas para estimar a quantidade de material necessário para os respectivos testes:

Teste	Massa da amostra necessária (kg)
Relação umidade / densidade (modificada AASHTO T180)	40
Determinação da adição ideal de cimento (espécimes de 150 mm Ø)	120
Testes padrão do solo (nivelamento, Limites de Atterberg , teor de umidade, etc.)	20

A1.1.2 Determinação da relação de umidade / densidade do material tratado

Este teste é realizado utilizando-se o esforço padrão de compactação para determinar o Teor Ideal de Umidade (OMC) e a Densidade Seca Máxima (MDD) do material estabilizado com cimento.

Etapa 1. Pese a massa necessária do agente estabilizante em cada uma das cinco amostras de 7 kg preparadas conforme descrito na Seção A1.1.1. A quantidade de agente estabilizante necessária (expressa como um percentual por massa da amostra seca) deve ser próxima ao ideal previsto para o material sob tratamento. Na ausência de testes anteriores, os seguintes podem ser utilizados como uma diretriz:

Camadas da sub-base:	2% para material graúdo	(> 50% retidos na peneira de 4,75 mm)
	3% para material fino	(< 50% retidos na peneira de 4,75 mm)
Camadas da base:	3% para material graúdo	(> 50% retidos na peneira de 4,75 mm)
	4% para material fino	(< 50% retidos na peneira de 4,75 mm)

Etapa 2. Adicione o agente estabilizante ao material bruto e misture imediatamente antes de adicionar a água. Para estimular as condições na rodovia, a compactação do material estabilizado é retardada por uma hora após a mistura do material não tratado com o agente estabilizante e a água. O material misturado é colocado em um container hermético para evitar a perda de umidade e misturado por inteiro a cada quinze minutos.

Etapa 3. Determine o OMC e o MDD para o material estabilizado de acordo com o procedimento de teste da relação modificada de umidade-densidade (AASHTO T-180).

A1.1.3 Manufatura de espécimes para teste

O procedimento descrito abaixo é para a manufatura de espécimes com 150 mm de diâmetro e 127 mm de altura. Estes espécimes serão utilizados para determinar a Resistência à Compressão Não Confinada (UCS) e à Resistência à Tensão Indireta (ITS) do material.

Etapa 1. Colocar 20 kg da amostra, preparada conforme descrito na Seção A1.1.1, em um recipiente apropriado para mistura.

Etapa 2. Determinar a massa seca da amostra utilizando a equação A1.1.2.

$$M_{sample} = \frac{(M_{air\text{-}dry})}{\left(1 + \left(\frac{W_{air\text{-}dry}}{100}\right)\right)}$$

[equação A1.1.2]

onde:

M_{sample}	= massa seca da amostra	[g]
$M_{air\text{-}dry}$	= massa seca a ar da amostra	[g]
$W_{air\text{-}dry}$	= teor de umidade da amostra seca com ar	[% por massa]

Etapa 3. Determinar a quantidade necessária de agente estabilizante utilizando a equação A1.1.3.

$$M_{cement} = \frac{C_{add}}{100} \times M_{sample}$$

[equação A1.1.3]

onde:

M_{cement}	= massa de cal ou cimento a ser adicionada	[g]
C_{add}	= percentual de cal ou cimento necessário	[% por massa]
M_{sample}	= massa seca da amostra	[g]

Etapa 4. Determine the percentage water to be added for optimum mixing purposes using equation A1.1.4.

$$W_{add} = W_{OMC} - W_{air\text{-}dry} \quad \text{[equação A1.1.4]}$$

onde:

W_{add} = água a ser adicionada à amostra [% por massa]
W_{OMC} = teor ideal de umidade [% por massa]
$W_{air\text{-}dry}$ = água na amostra seca com ar [% por massa]

A quantidade (massa) de água a ser adicionada à amostra é determinada utilizando a Equação A1.1.5.

$$M_{water} = \frac{W_{add}}{100} \times (M_{sample} + M_{cement}) \quad \text{[equação A1.1.5]}$$

onde:

M_{water} = massa de água a ser adicionada [g]
W_{add} = água a ser adicionada à amostra [segundo equação A1.1.4) [% por massa]
M_{sample} = massa seca da amostra [g]
M_{cement} = massa de cal ou cimento a ser adicionada [g]

Etapa 5. Misture o material, cimento e água até ficar uniforme. Deixe o material misturado parado por uma hora com a mistura ocasional (conforme descrito na Seção A1.1.2). Manufature três amostras, cada uma com 150 mm de diâmetro e 127 mm de altura, utilizando o esforço de compactação AASHTO (T-180) modificado.

Etapa 6. As amostras são retiradas durante o processo de compactação e secas em uma massa constante, para determinar o teor de umidade para moldagem (Wmould) utilizando a equação A1.1.6.

$$W_{mould} = \frac{(M_{moist} - M_{dry})}{M_{dry}} \times 100 \quad \text{[equação A1.1.6]}$$

onde:

W_{mould} = teor de umidade para moldagem [% por massa]
M_{moist} = massa de material úmido [g]
M_{dry} = massa de material seco [g]

Etapa 7 to 9. Repita os passos acima, no mínimo, com três teores diferentes de estabilizante

Etapa 10. Remova os espécimes dos moldes desmontando os moldes divididos ou, se moldes comuns forem utilizados, extraindo os espécimes cuidadosamente com um macaco de extrusão, evitando a distorção dos espécimes compactados

Etapa 11. Registre a massa e volume de cada espécime e determine a densidade seca utilizando a equação A1.1.7.

$$DD = \frac{(M_{spec})}{Vol} \times \frac{100}{W_{mould} + 100} \times 1.000$$

[equação A1.1.7]

onde:

DD	= densidade seca	[kg/m^3]
M_{spec}	= massa do espécime	[g]
Vol	= volume do espécime	[cm^3]
W_{mould}	= teor de umidade para moldagem	[%]

Observação:

- Com certos materiais sem coesão, pode ser necessário deixar as amostras nos moldes durante 24 horas para desenvolver a resistência antes da extração. Quando necessário, as amostras nos moldes devem ser mantidas em uma sala de cura ou cobertas com um pano molhado (estopa).

A1.1.4 Cura das amostras

A1.1.4.1 Cura padrão

Cure as amostras durante sete dias com uma umidade relativa de 95% a 100% e a uma temperatura de 20° C a 25° C em uma sala de cura apropriada.

A1.1.4.2 Cura acelerada

Coloque cada amostra em sacos plásticos vedados e cure em um forno com temperatura entre 70°C e 75°C durante 24 horas. (Observação: Se a cal hidratada for substituída por cimento como agente estabilizante, o método de cura deve ser trocado para 60°C a 62°C durante 45 horas.)

Após o período de cura, remova as amostras da sala de cura (ou sacos plásticos) e deixe esfriar em temperatura ambiente, se necessário. As amostras dos testes de resistência à compressão não confinada (UCS) devem ser submersas em água com temperatura entre 22ºC e 25ºC durante quatro horas antes do teste.

A1.1.5 Testes de resistência

Após a cura, duas das amostras são testadas para determinar a Resistência à Compressão Não Confinada (UCS) e a terceira amostra remanescente deve ser testada quanto à Resistência à Tensão Indireta (ITS). Os procedimentos de teste são descritos abaixo.

A1.1.5.1 Teste de resistência à compressão não confinada (UCS)

A Resistência à Compressão Não Confinada é determinada medindo-se a carga máxima a falhar de uma amostra submetida a uma taxa constante de 140 kPa/s (153 kN / min). O procedimento é o seguinte:

Amostra de UCS na prensa após alcançar a carga de pico.

Etapa 1. Coloque a amostra no seu lado plano entre as placas da máquina de teste de compressão. Posicione a amostra de maneira a centralizá-la nas placas de carregamento.

Etapa 2. Aplique a carga à amostra, sem choque, a uma taxa de avanço de 140 kPa / s até alcançar a carga máxima. Registre a carga máxima P (em kN), exatamente em 0,1 kN.

Etapa 3. Calcule a UCS de cada amostra o mais próximo de 1 kPa utilizando a equação A1.1.8.

$$UCS = \frac{(4 \times P)}{(\pi \times d^2)} \times 1{,}000{,}000$$

[equação A1.1.8]

onde:

UCS	= resistência à compressão não confinada	[kPa]
P	= carga máxima para falha	[kN]
d	= diâmetro da amostra	[mm]

Etapa 4. Faça um gráfico das resistências UCS alcançadas contra o percentual de agente estabilizante adicionado durante a UCS media das duas amostras testadas para cada teor de estabilizador diferente. Ignore todos os resultados incorretos óbvios que possam ter sido causados por danos à amostra antes dos testes.

A1.1.5.2 Teste de resistência à tensão indireta (ITS)

A ITS de uma amostra é determinada medindo-se a última carga a falhar aplicada ao eixo diametral a uma taxa constante de deformação de 50,8 mm / minuto. Amostras curadas são testadas (não saturadas) a uma temperatura de 25° C (± 2° C) utilizando o seguinte procedimento:

Amostra de ITS colocada entre as faixas de carregamento.

Etapa 1. Coloque a amostra sobre o gabarito de ITS. (Garanta que as faixas de carregamento corretas são apropriadas para o diâmetro da amostra). Posicione a amostra de maneira a que as faixas de carregamento fiquem paralelas e centralizadas no plano diametral vertical.

Etapa 2. Coloque a placa de transferência sobre a faixa de sustentação superior e posicione o conjunto do gabarito sob a rampa de carregamento do dispositivo de teste da compressão.

Etapa 3. Aplique a carga à amostra, sem choque, a uma taxa de avanço de 50,8 mm por minuto até alcançar a carga máxima.

Etapa 4. Registre a carga máxima P (em kN), exatamente em 0,1 kN.

Etapa 5. Calculate the ITS value for each specimen to the nearest 1 kPa using Equation A1.2.13.

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 1{,}000{,}000$$ [equação A1.1.9]

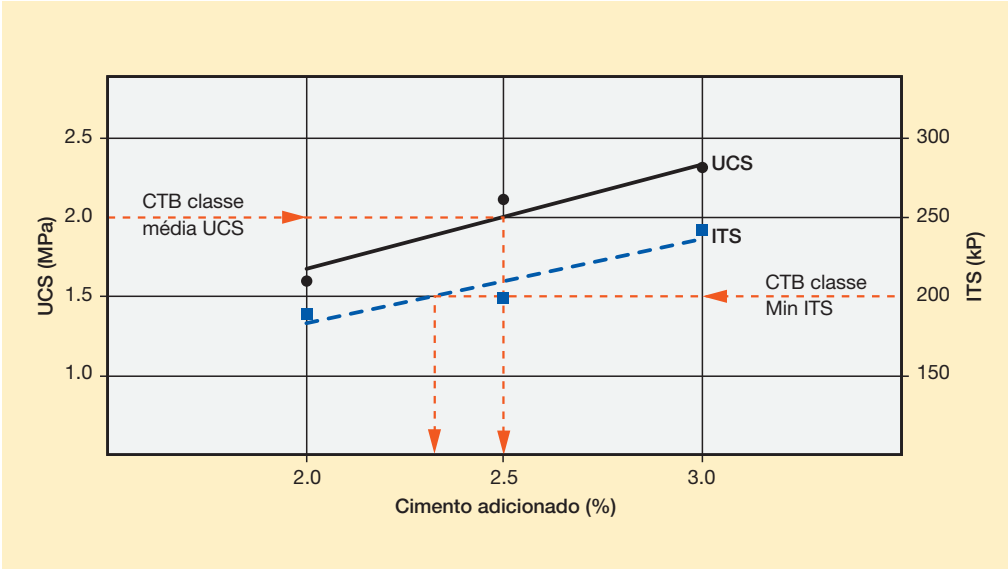
onde:

ITS	= Resistência à Tensão Indireta	[kPa]
P	= carga máxima aplicada	[kN]
h	= altura média da amostra	[mm]
d	= diâmetro da amostra	[mm]

Etapa 6. Faça um gráfico da resistência ITS alcançada em comparação com o percentual de agente estabilizante adicionado.

A1.1.6 Determinação da aplicação exigida do agente estabilizante

A taxa de aplicação exigida do agente estabilizante é aquele percentual no qual os critérios mínimos exigidos são atendidos.



O exemplo no gráfico acima indica que uma adição de 2,5% de cimento atenderá aos requisitos para a classe específica mostrada para o material de cimento estabilizado.

A1.2 Procedimento do projeto de mistura para estabilização de espuma de asfalto

Os procedimentos do projeto da mistura para a estabilização de espuma de asfalto descrita abaixo são realizados em amostras representativas do com os seguintes objetivos preliminares:

- Determinar se o material é apropriado para estabilização com espuma de asfalto;
- Determinar se um filler ativo necessita ser adicionado em conjunto com espuma de asfalto;
- Determinar as quantidades de espuma de asfalto e de filler ativo que necessitam ser aplicadas para uma estabilização eficiente; e
- Para se obter uma indicação do comportamento (propriedades de engenharia) do material estabilizado.

Os vários testes que são realizados tanto em amostras não tratadas e tratadas são essencialmente "testes de rotina" que podem ser realizados pela maioria dos laboratórios equipados para solos normais de rotina e teste do asfalto.

A1.2.1 Amostragem e preparação

A1.2.1.1 Amostragem em campo

Amostras em grande quantidade são obtidas de poços de teste escavados como parte das pesquisas de campo (ou de poços emprestados ou pedreiras onde os materiais frescos devem ser importados e estabilizados). Cada camada no pavimento superior (± 300 mm) deve ser amostrada em separado e, no mínimo, 200 kg de material recuperado de cada camada provavelmente devem ser incluídos em todas as operações de reciclagem e, consequentemente, exigirão um projeto de mistura.

Observação:

- As amostras retiradas de camadas de material ligado (asfalto e materiais previamente estabilizados) devem ser pulverizadas in situ utilizando uma pequena fresadora (ou uma recicladora) para simular a granulometria que será obtida quando o pavimento for reciclado.

A1.2.1.2 Testes padrão do solo

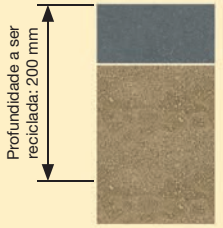
Realize os seguintes testes padrão do material amostrado de cada camada individual ou fonte:

- Análise de peneira para determinar a granulometria (procedimento de lavagem de finos, ASTM D 422);
- Limites de Atterberg para determinar o índice de plasticidade (ASTM D 4318); e
- Relação umidade/densidade (AASHTO T-180).

A1.2.1.3 Mistura da Amostra

Se necessário, misture os materiais das amostras de diferentes camadas (e/ou material novo) para obter uma amostra combinada que represente o material de toda a profundidade da reciclagem. A densidade in situ dos vários materiais componentes deve ser considerada quando se misturam materiais, conforme ilustrado no exemplo mostrado abaixo.

Estrutura do pavimento superior existente



60 mm Asfalto (densidade in situ 2.300 kg/m³)

250 mm de brita graduada (GCS) (densidade in situ 2.000 kg/m³)

Misture os materiais proporcionalmente à espessura da camada e à densidade in situ, conforme segue:

Material	Massa/m² (kg)	Proporção por massa (%)	Por amostra de 10 kg (g)
Asfalto (60 mm at 2.300 kg/m³)	0,06 x 2.300 = 138	138/418 = 0,33	0,33 x 10.000 = 3.300
GCS (140 mm at 2.000 kg/m³)	0,14 x 2.000 = 280	280/418 = 0,67	0,67 x 10.000 = 6.700
Total	418	1,00	10.000

Observação:

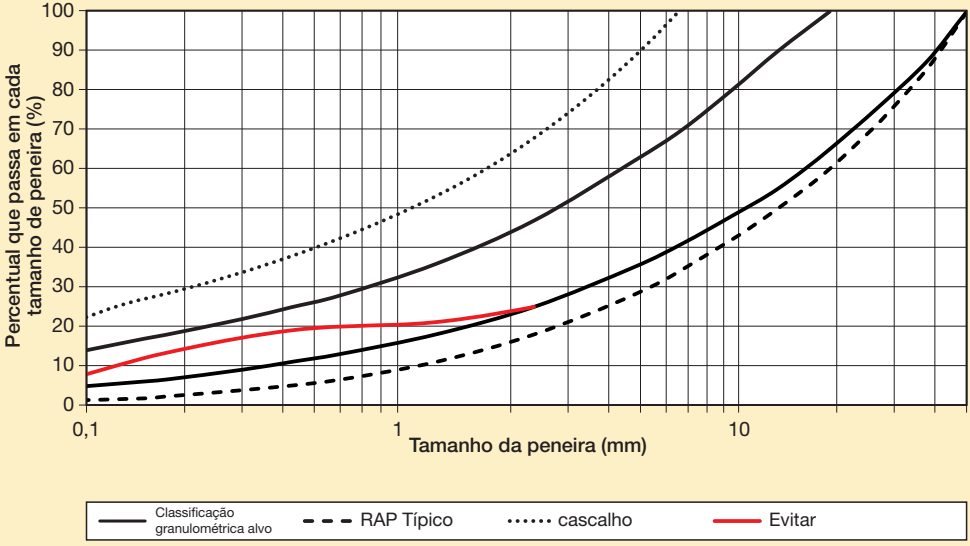
- Repita os testes padrão do solo listados na Seção A1.2.1.2 acima para determinar o nivelamento, o índice de plasticidade e a relação umidade/densidade da amostra misturada.

A1.2.1.4 Granulometria (análise da peneira)

Faça um gráfico da curva de granulometria da amostra que será utilizada nos projetos da mistura. Inclua no gráfico as “Granulometrias alvo” da tabela abaixo. Se o material for predominantemente RAP ou Cascalho Natural, inclua a curva pertinente (também da tabela abaixo). Este gráfico indicará se é necessária uma mistura adicional com material novo importado. Entretanto, se o gráfico incluir uma “proeminência” nas frações entre as peneiras de 0,075 mm e de 2 mm (conforme mostrado na linha vermelha “Evitar” no gráfico abaixo), a amostra deve ser misturada com material fino suficiente (por exemplo: 10% por volume de poeira da britadeira de menos de 5 mm) para reduzir a magnitude da proeminência.

Observação:

- Este exercício é aconselhável, pois permite uma indicação preliminar da resistência que pode ser esperada depois de o material ser tratado com espuma de cimento. (Um material com granulometria ruim é difícil de compactar e, consequentemente, a baixa densidade obtida afetará significativamente a resistência, especialmente sob condições saturadas.)



Curvas de classificação granulométrica recomendadas

Tamanho da peneira (mm)	Percentual que passa em cada tamanho de peneira (%)			
	Classificação granulométrica alvo		Material RAP típico	Cascalho natural
	Graúdo	Fino		
50	100	100	100	100
37,5	87	100	85	100
26,5	76	100	72	100
19	65	100	60	100
13,2	55	90	50	100
9,5	48	80	42	100
6,7	41	70	35	100
4,75	35	62	28	88
2,36	25	47	18	68
1,18	18	36	11	53
0,6	13	28	7	42
0,425	11	25	5	38
0,3	9	22	4	34
0,15	6	17	2	27
0,075	4	12	1	20

A1.2.1.5 Proporção adequada representativa

Separar o material na amostra preparada nas seguintes quatro frações:

i. Retido na peneira de 19,0 mm;
ii. Passa na peneira de 19,0 mm, mas fica retido na peneira de 13,2 mm;
iii. Passa na peneira de 13,2 mm, mas fica retido na peneira de 4,75 mm; e
iv. Passa na peneira de 4,75 mm.

Reconstitua as amostras representativas de acordo com o tamanho da partícula determinado acima (para o exemplo do material grosso) para a porção que passa pela peneira de 19,0 mm. Substitua a porção retida na peneira de 19,0 mm por material que passa pela peneira de 19,0 mm e fica retido na peneira de 13,2. O exemplo na tabela abaixo explica o procedimento:

Análise da peneira		Quantidade de material a ser incluído na amostra de 10 kg		
Tamanho da peneira (mm)	Percentual que passa (resultado da análise da peneira da amostra a granel)	Passa em 4,75 mm	Passa em 13,2 mm, e retido em 4,75 mm	Passa em 19,0 mm, e retido em 13,2 mm
19,0	90,5	(53,6/100 x 10.000) = 5.360 g	((72,3-53,6)/100 x 10.000) = 1.870 g	((100-72,3)/100 x 10.000) = 2.770 g
13,2	72,3			
4,75	53,6			

Se material insuficiente passar na peneira de 19,0 mm, mas ficar retido na peneira de 13,2 mm, para substituir aquele retido na peneira de 19,0 mm, triture levemente o material retido na peneira de 19,0 mm para fornecer mais desta fração.

A1.2.1.6 Teor de umidade higroscópica

Duas amostras representativas secas com ar, cada uma com cerca de 1 kg, são utilizadas para determinar o teor de umidade higroscópica (secas a ar) do material. (Observação: Uma amostra de tamanho maior deve ser utilizada para materiais com classificação mais graúda.) Pese as amostras secas com ar, o mais precisamente próximo a 0,1 g e então as coloque em um forno com uma temperatura entre 105° C e 110° C até as mesmas alcançarem uma massa constante. O teor de umidade higroscópica (seca ao ar) é a perda de massa expressa como um percentual da massa seca da amostra. Determinar a umidade higroscópica utilizando a Equação A1.2.1.

$$W_{air\text{-}dry} = \frac{(M_{air\text{-}dry} - M_{dry})}{100} \times 100$$ [equação A1.2.1]

onde:
$W_{air\text{-}dry}$ = teor de umidade higroscópica [% por massa]
$M_{air\text{-}dry}$ = massa de material seco a ar [g]
M_{dry} = massa de material seco em forno [g]

A1.2.1.7 Quantidades de amostras

As diretrizes mostradas na seguinte tabela devem ser utilizadas para estimar a quantidade de material necessário para os respectivos testes:

Teste	Massa da amostra necessária (kg)
Relação umidade/densidade (modificada AASHTO T180)	40
Determinação da necessidade de filler ativo (espécimes de 100 mm Ø)	60
Indicação da adição ideal de betume (espécimes de 100 mm Ø)	80
Indicação da adição ideal de betume (espécimes de 150 mm Ø)	100
Testes padrão do solo (nivelamento, Limites de Atterberg , teor de umidade, etc.)	20

A1.2.2 Requisitos do filler ativo

A1.2.2.1 Efeito da plasticidade

A estabilização da espuma de betuma é normalmente realizada em combinação com uma pequena quantidade (1% por massa) de filler ativo (cimento ou cal hidratada) para aumentar a dispersão do betume e reduzir a suscetibilidade. O Índice de Plasticidade (PI) do material normalmente é utilizado como uma diretriz para o uso de cal hidratada ou cimento na mistura:

Índice de Plasticidade: < 10	Índice de Plasticidade: > 10
Realize seus testes de ITS em amostras de 100 mm Ø para determinar a necessidade de adicionar cimento ou cal hidratada, conforme descrito na Seção A1.2.2.2 abaixo.	Trate previamente o material com cal hidratada (valor ICL) (O consumo inicial de cal (valor ICL) deve, primeiramente, ser determinado utilizando o teste apropriado do pH.)

O pré-tratamento do material com um PI > 10 exige que a cal e a água sejam adicionadas, no mínimo, 2 horas antes da adição da espuma de asfalto. O material tratado previamente é colocado em um container hermético para reter a umidade. O teor de umidade é então verificado e, se necessário, ajustado antes de adicionar o agente estabilizante do betume (conforme descrito na Seção A1.2.4).

Observação:

- Quando o material for previamente tratado com cal, os seguintes testes para a “Determinação dos Requisitos do Filler Ativo, descritos na Seção A1.2.2.2 abaixo não são necessários.

A1.2.2.2 Determinação dos requisitos de filler ativo

Quando PI < 10, a necessidade de um filler ativo e o tipo de filler ativo (cimento ou cal hidratada) apropriado para o material, deve ser determinada primeiramente pela realização de testes ITS nas amostras de 100 mm de diâmetro para diferentes misturas feitas a partir da mesma amostra. A quantidade de espuma de asfalto adicionada a cada uma das três misturas é constante, utilizando as frações que passem pelas peneiras de 4,75 mm e 0,075 mm como uma diretriz, conforme mostrado na tabela a seguir:

Diretrizes para estimar a adição ideal de espuma de asfalto			
Fração que passe na peneira de 0,075 mm (%)	**Adição de espuma de asfalto. (% por massa de agregado seco)**		**Tipo característico de material**
	Fração que passe na peneira de 4,75 mm		
	< 50%	> 50%	
< 4	**2,0**	**2,0**	Asfalto reciclado (RA/RAP)
4 – 7	**2,2**	**2,4**	RA/ Pedra triturada/cascalho natural/misturas
7 – 10	**2,4**	**2,8**	
> 10	**2,6**	**3,2**	Cascalho/areias

A primeira das três misturas não contém filler ativo, 1% de cimento é adicionado à segunda mistura e 1% de cal hidratada é adicionado à terceira mistura, sendo as três misturas tratadas com a mesma quantidade de espuma de asfalto. Material de cada uma das três misturas é utilizado para manufaturar espécimes de 100 mm de diâmetro, curadas e testadas para o ITS_{DRY} e os valores de ITS_{WET} pertinentes (conforme descrito nas Seções A1.2.4 a A1.2.8 abaixo). O valor da Resistência à Tensão Retida (TSR) é então utilizado como o principal indicador da necessidade de um filler ativo.

Quando o valor de TSR da mistura sem filler ativo adicionado for superior a 60%, o projeto da mistura deve ser realizado sem filler ativo. (Esta situação normalmente é restrita a materiais com pedra britada de boa qualidade, e frequentemente inclui uma proporção significativa do material de asfalto recuperado (RAP.)

Quando o valor TSR da mistura sem filler ativo for inferior a 60%, a mistura com o tipo de filler ativo que produzir um valor de TSR significativamente mais elevado (> 5%) indica uma preferência por cimento ou cal hidratada e deve ser utilizado nos seguintes projetos da mistura. Se os valores de TSR para ambos os fillers ativos forem da mesma ordem (diferença de < 5%), então qualquer um dos tipos de filler ativo é apropriado.

Observação:

- Para determinar a sensibilidade do filler ativo, testes adicionais em espécimes com 100 mm de diâmetro podem ser realizados utilizando-se o filler ativo preferido a uma taxa de aplicação mais baixa (por exemplo, 0,75%). No entanto, para evitar o comprometimento da flexibilidade da mistura, a taxa de aplicação máxima permissível para filler ativo é de 1,0%, a qual somente deve ser excedida quando cal hidratada for aplicada como um pré--tratamento para eliminar a plasticidade.

A1.2.3 Determinação das propriedades para produzir espuma do betume

The foaming properties of bitumen are characterised by:

- Taxa de expansão. Uma medida da viscosidade da espuma de asfalto, calculada como o coeficiente do volume máximo de espuma em relação ao volume original de betume; e
- Meia vida. Uma medida da estabilidade da espuma de asfalto, calculada como o tempo em segundos que a espuma leva para colapsar até a metade do seu volume máximo.

O objetivo da realização do procedimento a seguir é determinar a temperatura do betume e o percentual de adição de água necessário para produzir as melhores propriedades da espuma (taxa máxima de expansão e meia vida) para uma fonte específica de betume. Estas propriedades são medidas com três diferentes temperaturas de betume em uma faixa de 160º C a 190º C utilizando o seguinte procedimento:

Etapa 1. Aqueça o betume na chaleira da unidade do laboratório WLB 10 S da Wirtgen com a bomba circulando o betume através do sistema até alcançar a temperatura necessária (iniciando normalmente com 160°C). Mantenha a temperatura necessária por, no mínimo, 5 minutos antes de iniciar os testes.

Planta do laboratório WLB 10 S

Etapa 2. Seguindo os procedimentos padrão descritos no Manual do Usuário para o Wirtgen WLB 10 S, calibre a taxa de descarga do betume ($Q_{bitumen}$) e ajuste o timer da unidade para descarregar 500 g de betume.

Etapa 3. Ajuste o medidor de vazão da água para alcançar a taxa de injeção de água necessária.

Etapa 4. Descarregue a espuma de asfalto em um tambor de aço previamente aquecido (± 75° C) por um tempo de pulverização calculado para 500 g de betume. Imediatamente após a parada da descarga de espuma, ligue um cronômetro.

Etapa 5. Utilizando a vareta de medição fornecida com a máquina Wirtgen WLB 10 S (que está calibrada para um tambor de aço de 275 mm de diâmetro e 500 g de betume) meça a altura máxima que a espuma de asfalto alcança no tambor. Isso é registrado como o volume máximo.

Etapa 6. Utilize um cronometro para medir o tempo em segundos que a espuma leva para dissipar até a metade do seu volume máximo. Isso é registrado como a meia vida da espuma de asfalto

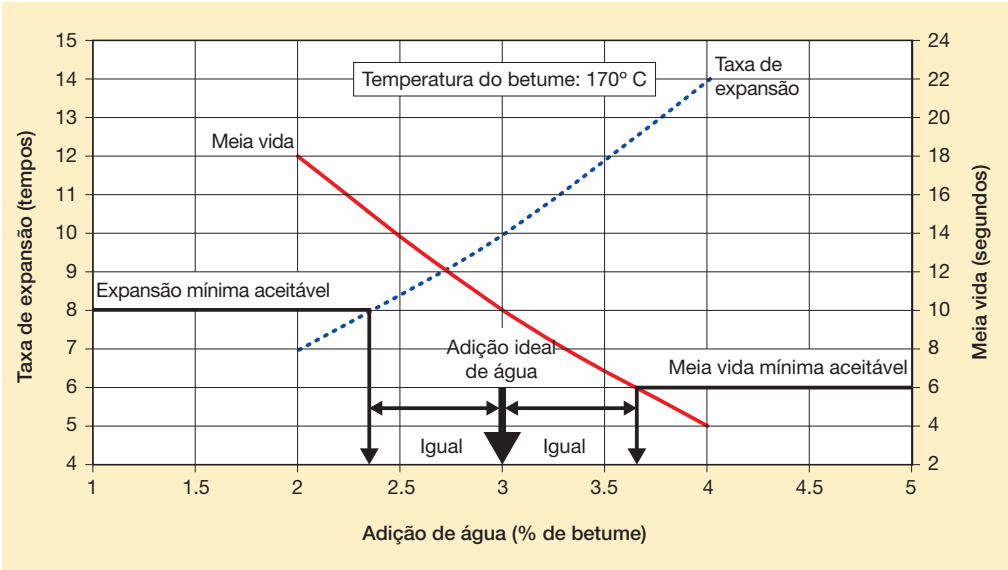
Etapa 7. Repita o procedimento acima três vezes ou até leituras similares serem obtidas.

Etapa 8. Repita as etapas 3 a 7 para uma faixa de, no mínimo, três taxas de injeção de água. (Tipicamente, são utilizados valores de 2%, 3% e 4% por massa de betume).

Etapa 9. Faça um gráfico do coeficiente de expansão versus a meia vida com diferentes taxas de injeção de água no mesmo conjunto de eixos (vide o exemplo no gráfico abaixo). A adição ideal de água é selecionada como uma média de dois teores de água necessários para atender a esses critérios mínimos.

Repita as Etapas 1 a 9 para duas outras temperaturas do betume (normalmente 170° C e 180° C).

A temperatura e adição ideal de água que produzem a melhor espuma são então utilizadas no procedimento de projeto da mistura descrito abaixo.



Determinação da adição ideal de água para formação de espuma (exemplo)

Observação:

- As propriedades mínimas absolutas da formação de espuma, aceitáveis para uma estabilização eficaz (temperatura do material > 15° C) são:

  Coeficiente de expansão: 8 vezes
  Meia vida 6 segundos

  Se estas exigências mínimas não puderem ser atendidas, o betume deve ser rejeitado como impróprio para uso.

A1.2.4 Tratando a amostra com espuma de asfalto

Planta de laboratório WLB 10 S acoplada à misturadora pugmill WLM

Etapa 1. Coloque a massa necessária da amostra (entre 20 kg e30 kg, preparada conforme descrito na Seção A1.2.1 acima) na misturadora pugmill Wirtgen WLM 30

Etapa 2. Determine a massa seca da amostra utilizando a equação A1.2.2.

$$M_{sample} = \frac{(M_{air\text{-}dry})}{\left(1 + \left(\frac{W_{air\text{-}dry}}{100}\right)\right)}$$

[Equação A1.2.2]

onde:

M_{sample} = massa seca da amostra [g]
$M_{air\text{-}dry}$ = massa seca ao ar da amostra [g]
$W_{air\text{-}dry}$ = teor de umidade da amostra seca com ar [% por massa]

Etapa 3. Determine a massa necessária de filler ativo (cal ou cimento) a ser adicionada utilizando a Equação A1.2.3.

$$M_{cement} = \frac{C_{add}}{100} \times M_{sample}$$

[Equação A1.2.3]

onde:

M_{cement} = massa de cal ou cimento a ser adicionada [g]
C_{add} = percentual de cal ou cimento necessário [% por massa]
M_{sample} = massa seca da amostra [g]

Etapa 4. Determine o percentual de água a ser adicionado para alcançar o teor de umidade ideal da mistura (75% de OMC do material), calculada utilizando a Equação A1.2.4.

$$W_{add} = 0{,}75\ W_{OMC} - W_{air\text{-}dry} \quad \text{[Equação A1.2.4]}$$

onde:

W_{add}	= água a ser adicionada à amostra	[% por massa]
W_{OMC}	= teor ideal de	[% por massa]
$W_{air\text{-}dry}$	= água na amostra seca com ar	[% por massa]

A quantidade (massa) de água a ser adicionada à amostra é determinada utilizando a Equação A1.2.5.

$$M_{water} = \frac{W_{add}}{100} \times (M_{sample} + M_{cement}) \quad \text{[Equação A1.2.5]}$$

onde:

M_{water}	= massa de água a ser adicionada	[g]
W_{add}	= água a ser adicionada à amostra	[% por massa]
M_{sample}	= massa seca da amostra	[g]
M_{cement}	= massa de cal ou cimento a ser adicionada	[g]

Etapa 5. Misture o material, o filler ativo e água na misturadora até ficar uniforme. Após a mistura, inspecione a amostra para garantir que o material está em um estado “fluffed”.

- Se alguma poeira for observada, adicione pequenas quantidades de água (nominalmente 0,25% a cada vez) e misture novamente até obter um estado “fluffed” sem qualquer poeira visível.
- Se o material estiver “pegajoso” com uma tendência de se acumular contra o lado da misturadora, então o teor de umidade está demasiado alto para a mistura com espuma de asfalto. Rejeite a amostra. Inicie novamente com uma amostra nova utilizando um teor mais baixo de umidade.

Etapa 6. Determine a quantidade de espuma de asfalto a ser adicionada utilizando a Equação A1.2.6.

$$M_{bitumen} = \frac{B_{add}}{100} \times (M_{sample} + M_{cement})$$ [Equação A1.2.6]

onde:

$M_{bitumen}$	= massa de espuma de asfalto a ser adicionada	[g]
B_{add}	= teor de espuma de asfalto	[% por massa]
M_{sample}	= massa seca da amostra	[g]
M_{cement}	= massa de cal ou cimento adicionada	[g]

Etapa 7. Determine o ajuste do timer na Wirtgen WLB 10 S utilizando a Equação A1.2.7.

$$T = \frac{M_{bitumen}}{Q_{bitumen}}$$ [Equação A1.2.7]

onde:

T	= tempo para ajustar o timer da WLB 10 S	[s]
$M_{bitumen}$	= massa de espuma de asfalto a ser adicionada	[g]
$Q_{bitumen}$	= taxa de fluxo do betume para a WLB10 S	[g/s]

Etapa 8. Acople a WLB 10 S da Wirtgen à misturadora WLM 30 de maneira a que a espuma de asfalto possa ser descarregada diretamente dentro da câmara de mistura.

Etapa 9. Ligue a misturadora e deixe-a misturar por, no mínimo, 10 segundos antes de descarregar a massa necessária de espuma de asfalto dentro da misturadora. Após a descarga da espuma de asfalto, continue misturando por mais 30 segundos ou até a mistura ficar uniforme.

Etapa 10. Determine a massa de água necessária para trazer a amostra ao OMC utilizando a Equação A1.2.8.

$$M_{plus} = \frac{M_{water}}{3}$$ [Equação A1.2.8]

onde:

M_{plus} = massa de água a ser adicionada [g]
M_{water} = massa de água adicionada previamente (equação A1.2.5) [g]

Etapa 11. Adicione o resto da água e misture até ficar uniforme.

Etapa 12. Transfira a espuma de asfalto tratada para um recipiente hermético e vede imediatamente. Para minimizar a perda de umidade, manufature amostras de teste assim que possível seguindo o procedimento pertinente em amostras de 100 mm ou de 150 mm de diâmetro, conforme descrito nas seções A1.2.5.1 e A1.2.5.2 respectivamente.

Repita as etapas acima em, no mínimo, quatro misturas com teores diferentes de espuma de asfalto em intervalos de 0,2%.
As "Diretrizes para estimar a adição ideal de espuma de asfalto" (Seção A1.2.2.2 acima) devem ser utilizadas para determinar o ponto médio da extensão de espuma de asfalto a ser adicionada às quatro amostras.

Um exemplo. Se o material consistir de uma mistura de RAP e brita com 39% e 8% passando nas peneiras de 4,75 mm e 0,075 mm respectivamente. As diretrizes na Seção A1.2.2.2 indicam uma adição ideal de betume de 2,4%. A quantidade de espuma de asfalto a ser adicionada a cada amostra (todas com a mesma quantidade de filler ativo e com o mesmo teor de umidade) é:

Amostra 1: > 2,1%
Amostra 2: > 2,3%
Amostra 3: > 2,5%
Amostra 4: > 2,7%

A1.2.5 Manufatura de amostras para teste

Os procedimentos descritos abaixo são para a manufatura de dois tamanhos diferentes de amostras utilizando diferentes procedimentos de compactação:

Tamanho da amostra e esforço de compactação aplicado no processo de manufatura		
Diâmetro da amostra	**Altura da amostra**	**Esforço de compactação**
100 mm	63,5 mm	Marshall modificado*
150 mm	95,0 mm	AASHTO modificado

* 75 sopros por superfície

As duas questões a seguir são normalmente levantadas:

1. **Qual o tamanho de amostra que deve ser manufaturado?** Conforme descrito na Seção A1.2.8 abaixo, os valores de ITS_{DRY} e ITS_{WET} são normalmente determinados a partir de amostras com diâmetro de 100 mm. Amostras com 150 mm de diâmetro podem ser substituídas por amostras de 100 mm de diâmetro para obter os mesmos valores. Contudo, quando se trata de material graúdo, (isto é, quando a curva de classificação tende na direção do lado graúdo da granulometria recomendada) recomenda-se manufaturar e testar amostras com 150 mm de diâmetro no lugar de amostras menores de 100 mm de diâmetro. **Observação:** Somente amostras com 150 mm de diâmetro são utilizadas para determinar os valores de ITS_{EQUIL} e ITS_{SOAK}.

2. **Podem ser utilizados outros métodos de compactação?** Os procedimentos de compactação descritos abaixo são procedimentos padrão bem conhecidos, que podem ser realizados na maioria dos laboratórios em todo o mundo. Outros procedimentos podem ser utilizados (por exemplo, compactação giratória, martelo vibratório, mesa vibratória, etc.) desde que alcancem a mesma meta de densidade de compactação 100% Marshall para amostras de 100 mm ou 100% de densidade do mod. AASHTO T-180 para amostras de 150 mm de diâmetro.

A1.2.5.1 Manufatura de amostras de 100 mm de diâmetro

Um mínimo de seis (6) amostras de 100 mm de diâmetro, 63,5 mm de altura deve ser manufaturado para cada amostra de material tratado, aplicando-se o esforço de compactação Marshall modificado, conforme descrito nas etapas seguintes:

Etapa 1 Prepare o molde e o martelo Marshall limpando o molde, o colarinho, a placa de base e a superfície do martelo de compactação. Observação: o equipamento de compactação não deve ser aquecido, mas mantido em temperatura ambiente.

Etapa 2. Pese material suficiente para obter uma altura compactada de 63,5 mm ± 1,5 mm (Aproximadamente 1.100 g para a maioria dos materiais). Empurre a mistura com uma espátula 15 vezes ao redor do perímetro e 10 vezes na superfície, deixando a superfície levemente arredondada.

Etapa 3. Compacte a mistura aplicando 75 sopros com o martelo de compactação. Deve-se tomar cuidado para garantira a queda livre contínua do martelo.

Etapa 4. Remova o molde e o colarinho do pedestal e inverta a amostra (vire). Substitua e pressione-a firmemente para garantir que a mesma está presa na placa da base. Compacte a outra superfície da amostra com 75 sopros adicionais.

Etapa 5. Após a compactação, remova o molde da placa base e extruda a amostra por meio de um macaco de extrusão. Meça a altura da amostra e ajuste a quantidade de material se a altura não estiver dentro dos limites de 1,5 mm.

Observação: Materiais graúdos são frequentemente danificados durante o processo de extrusão. Portanto, recomenda-se que as amostras sejam deixadas em seus moldes por 24 horas permitindo o desenvolvimento de uma resistência suficiente antes da extrusão.

Repita as etapas 1 a 5 para a manufatura de, no mínimo, seis (6) amostras.

Etapa 6. Pegue ±1 kg de amostras representativas após a compactação da segunda e da quinta amostra, e seque até formar uma massa constante. Determine a umidade para moldagem utilizando a Equação A1.2.9.

$$W_{mould} = \frac{(M_{moist} - M_{dry})}{M_{dry}} \times 100$$ [Equação A1.2.9]

onde:

W_{mould} = teor de umidade para moldagem [% por massa]
M_{moist} = massa de material úmido [g]
M_{dry} = massa de material seco [g]

A1.2.5.2 Manufatura de amostras de 150 mm de diâmetro

Um mínimo de seis (6) amostras de 150 mm de diâmetro, 95 mm de altura, é manufaturado para cada amostra de material tratado, aplicando-se o esforço de compactação AASHTO (T-180) modificado, conforme descrito nas etapas seguintes:

Etapa 1. Prepare o equipamento limpando o molde, o colarinho, a placa de base e a superfície do martelo de compactação. (Tanto moldes "Proctor" divididos ou padrão podem ser utilizados, sendo cada um deles adaptado com um espaçador de 32 mm colocado na placa base para obter amostras de 95 mm (±1.5 mm) de altura.)

Observação: O martelo de compactação AASHTO modificado apresenta as seguintes especificações:

Diâmetro do martelo:	50 mm
Massa:	4.536 kg
Distância de queda:	457 mm

Etapa 2. Compacte cada amostra aplicando um esforço de compactação AASHTO (T-180) modificado (4 camadas de aproximadamente 25 mm de espessura, com cada um recebendo 55 sopros do martelo de queda.)

Etapa 3. Apare cuidadosamente o material excessivo das amostras, conforme especificado no método de teste AASHTO T-180.

Etapa 4. Após a compactação, remova o molde da placa base e extruda a amostra por meio de um macaco de extrusão. Quando moldes divididos forem utilizados, separe os segmentos e remova a amostra.

Observação: Coarse materials are often damaged during the extrusion process. It is therefore recommended that the specimens are left in their moulds for 24 hours allowing sufficient strength to develop before extruding.

Quando moldes divididos forem utilizados, é aconselhável deixar a amostra no molde por 4 horas antes de separar o molde e extrair a amostra.

Repita as etapas 1 a 4 para manufaturar, no mínimo, seis (6) amostras.

Etapa 5. Pegue ±1 kg de amostras representativas após a compactação da segunda e da quinta amostra, e seque até formar uma massa constante. Determine o teor de umidade para moldagem utilizando a Equação A1.2.9. (acima).

A1.2.6 Cura das amostras

Dois métodos de cura são descritos abaixo. O primeiro é um procedimento padrão para secar as amostras até obter uma massa constante. O segundo procedimento visa simular condições de campo em que o "teor de umidade equilibrado" é de aproximadamente 50% do OMC. Amostras de 100 mm e 150 mm de diâmetro podem ser curadas a seco (com massa constante) enquanto somente as amostras de 150 mm de diâmetro podem ser curadas com o teor de umidade equilibrado.

A1.2.6.1 Cura a seco

Coloque as amostras (tanto as com 100 mm como as de 150 mm de diâmetro) em um forno com tiragem forçada a 40° C e cure até obter uma massa constante (normalmente 72 horas).

Para determinar se a massa constante foi obtida, pese as amostras e coloque-as de volta no forno. Remova após 4 horas e pese novamente. Se a massa estiver constante, então continue com os testes. Se a massa não estiver constante, recoloque no forno e pese novamente após intervalos repetidos de 4 horas até obter uma massa constante.

Quando a massa constante for obtida, remova as amostras do formo e deixe-as esfriar até 25° C (± 2.0° C).

A1.2.6.2 Cura para simular condições do local

Coloque as amostras com 150 mm de diâmetro em um forno de tiragem forçada a 30° C por 20 horas (ou até o teor de umidade reduzir até aproximadamente 50% do OMC).

Retire as amostras do forno, e coloque cada uma em um saco plástico vedado (no mínimo, duas vezes o volume da amostra) e recoloque no forno a 40° C por mais 48 horas.

Remova as amostras do forno após 48 horas retirando os seus respectivos sacos plásticos, garantindo que a umidade nos sacos não entre em contato com a amostra. Deixe esfriar até 25° C (± 2.0° C).

A1.2.7 Preparando as amostras para testes

Após esfriar, determine a densidade total de cada amostra utilizando o seguinte procedimento:

Etapa 1. Determine a massa da amostra.

Etapa 2. Meça a altura da amostra em quatro locais igualmente espaçados ao redor da circunferência e calcule a altura média da amostra.

Etapa 3. Meça o diâmetro da amostra.

Etapa 4. Calcule a densidade total de cada amostra utilizando a Equação A1.2.10.

$$BD_{spec} = \frac{4 \times M_{spec}}{\pi \times d^2 \times h} \times 1.000.000 \qquad \text{[Equação A1.2.10]}$$

onde:

BD_{spec}	= densidade total da amostra	[kg/m^3]
M_{spec}	= massa da amostra	[g]
h	= altura média da amostra	[mm]
d	= diâmetro da amostra	[mm]

Exclua dos testes adicionais todas as amostras cuja densidade total for diferente da densidade média total de todas as seis (6) amostras em mais de 2,5%.

Etapa 5. Coloque metade das amostras (normalmente 3) embaixo da água em uma banheira de imersão por 24 horas a 25° C (± 2° C). Após 24 horas, remova as amostras da água, seque a superfície e teste imediatamente.

A1.2.8 Determinação da resistência à tensão indireta (ITS) das amostras

Amostra montada na prensa para o teste de ITS

A ITS de uma amostra é determinada medindo-se a última carga a falhar aplicada ao eixo diametral a uma taxa constante de deformação de 50,8 mm/minuto. Assegure-se de que a temperatura das amostras é de 25° C (± 2° C) e siga o procedimento descrito abaixo:

Etapa 1. Coloque a amostra sobre o gabarito de ITS. (Garanta que as faixas de carregamento corretas são apropriadas para o diâmetro da amostra). Posicione a amostra de maneira a que as faixas de carregamento fiquem paralelas e centralizadas no plano diametral vertical.

Etapa 2. Coloque a placa de transferência sobre a faixa de sustentação superior e posicione o conjunto do gabarito sob a rampa de carregamento do dispositivo de teste da compressão.

Etapa 3. Aplique a carga à amostra, sem choque, a uma taxa de avanço de 50,8 mm por minuto até alcançar a carga máxima.

Etapa 4. Registre a carga máxima P (em kN), exatamente em 0,1 kN.

Etapa 5. Registre o deslocamento na quebra até o mais próximo de 0,1 mm.

Etapa 6. Quebre a amostra no meio e registre a temperatura do seu centro.

Etapa 7. Quebre uma das amostras não submersas e seque até obter uma massa constante. Determine o teor de umidade curada utilizando a Equação A1.2.11..

$$W_{spec} = \frac{(M_{moist} - M_{dry})}{M_{dry}} \times 100 \quad \text{[Equação A1.2.11]}$$

onde:
W_{spec} = teor de umidade da amostra [% por massa]
M_{moist} = massa de material úmido [g]
M_{dry} = massa de material seco [g]

Determine a densidade seca de cada amostra utilizando a Equação A1.2.12.

$$DD_{spec} = BD_{spec} \times \left(1 - \frac{W_{spec}}{100}\right) \quad \text{[Equação A1.2.12]}$$

onde:
DD_{spec} = densidade seca da amostra [% por massa]
BD_{spec} = densidade total da amostra [g]
W_{spec} = teor de umidade da amostra [g]

Etapa 8. Quebre uma das amostras saturadas com água e seque até obter uma massa constante. Determine o teor de umidade após a saturação utilizando a Equação A1.2.11.

Etapa 9. Calcule o valor da ITS de cada amostra o mais próximo de 1 kPa utilizando a equação A1.2.13.

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 1.000.000$$ [Equação A1.2.13]

onde:

ITS	= Resistência à Tensão Indireta	[kPa]
P	= carga máxima aplicada	[kN]
h	= altura média da amostra	[mm]
d	= diâmetro da amostra	[mm]

Etapa 10. Utilize a Planilha no Anexo A1.2.1 para registrar os dados e o formulário no Anexo A1.2.2 para relatar os resultados.

Etapa 11. Somente para amostras curadas a seco, calcule o valor da Resistência à Tensão Retida (TSR) da amostra, utilizando a Equação A1.2.14.

$$TSR = \frac{Ave\ ITS_{WET}}{Ave\ ITS_{DRY}} \times 100$$ [Equação A1.2.14]

onde:

TSR	= Resistência à Tensão Retida	[%]
Ave ITS_{WET}	= valor ITS_{WET} médio	[kPa]
Ave ITS_{DRY}	= valor ITS_{DRY} médio	[kPa]

Observação: Para diferenciar entre os resultados obtidos de diferentes métodos de cura, a terminologia mostrada na tabela abaixo deve ser adotada para evitar confusões.

Termo	Diâmetro da amostra	Método de cura	Teor de umidade
ITS_{DRY}	100 mm ou 150 mm	72 h sem vedação	<1%
ITS_{WET}		24 h submersa em água	Saturado
ITS_{EQUIL}	somente 150 mm	20 h sem vedação, 48 h em uma bolsa vedada	± 50% de OMC
ITS_{SOAK}		24 h submersa em água	Semissaturado

A1.2.9 Interpretação dos resultados de teste da resistência à tensão indireta (ITS)

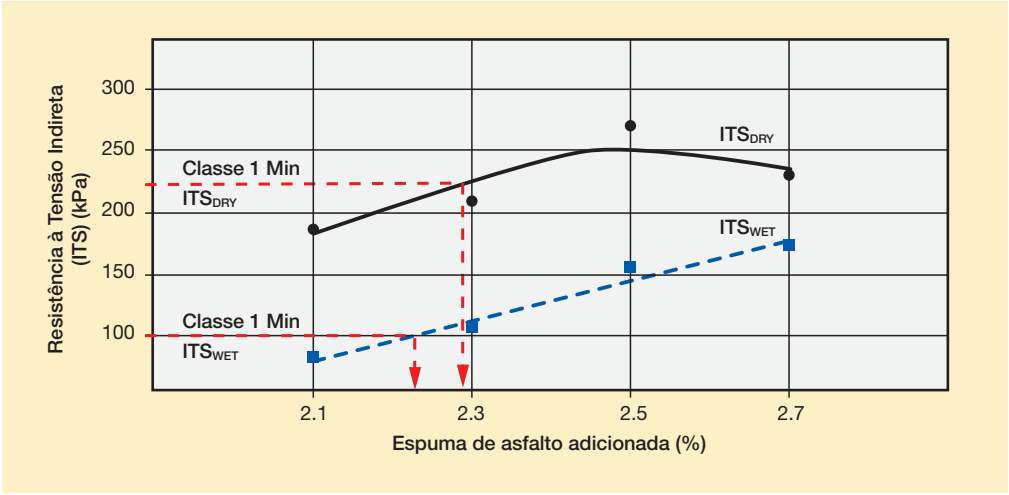
Faça um gráfico dos resultados respectivos dos testes de ITS com saturação e sem saturação em comparação com a adição pertinente de espuma de asfalto, conforme mostrado no exemplo abaixo. Se os resultados de dois métodos de cura diferentes forem obtidos, cada um deles deve ser colocado em um gráfico separado.

A espuma de asfalto adicionada que cumprir com o valor mínimo de ITS para a classificação do material é selecionada como o principal indicador da quantidade mínima de espuma de asfalto a ser adicionada. A avaliação da engenharia é então utilizada para determinar a quantidade de espuma de asfalto que deve ser adicionada para obter confiança suficiente, com base na variabilidade dos resultados de teste (a "bondade do ajuste" da curva de regressão ou linha através dos resultados dos teste em gráfico).

O exemplo abaixo explica o processo.

A tabela e gráfico dos resultados do teste ITS mostrados abaixo são valores típicos obtidos a partir de um projeto de mistura que utiliza amostras com diâmetro de 100 mm para material granulado natural tratado com espuma de asfalto. A curva através dos quatro pontos ITS_{DRY} aproxima a relação entre ITS_{DRY} e a espuma de asfalto adicionada. A linha através dos quatro pontos ITS_{WET} aproxima a relação entre ITS_{WET} e a espuma de asfalto adicionada. As linhas finas pontilhadas indicam que a adição entre 2,2% e 2,3% de espuma de asfalto atenderá aos requisitos para um material estabilizado com espuma de asfalto Classe 1 (ITS_{DRY} > 225 kPa e ITS_{WET} > 100 kPa).

Betume adicionado (%)	ITS_{DRY} (kPa)	ITS_{SOAK} (kPa)	TSR (%)
2,1	181	86	47,5
2,3	206	109	52,9
2,5	262	152	58,0
2,7	244	169	69,3



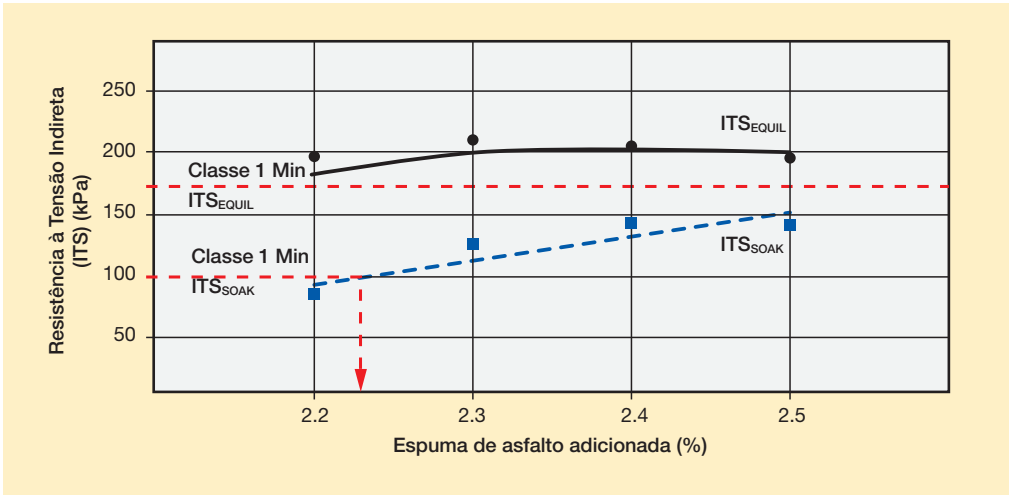
Amostras de 100 mm Ø

Os valores de TSR indicam que o material permanece suscetível à umidade após o tratamento com espuma de asfalto, especialmente quando a taxa de aplicação estiver abaixo de 2,3% (isto é, valor de TSR < 50%). Portanto, é importante assegurar que betume suficiente seja aplicado para alcançar o valor mínimo de ITSWET exigido para atender aos requisitos para uma classificação de Classe 1.

A avaliação da engenharia é então aplicada, com base no entendimento que os valores de ITS não são absolutos, juntamente com uma avaliação de que a variabilidade deve ser esperada quando se recicla material de um pavimento existente. Os resultados obtidos da mistura com 2,3% de espuma de asfalto adicionada, não atende à exigência de Classe 1 para ITS_{DRY}, enquanto ambos os valores de ITS_{DRY} e ITS_{WET} da mistura com 2,5% de adição de espuma de asfalto ultrapassam de longe as exigências mínimas da Classe 1. Isso sugere que uma taxa mínima de aplicação de 2,4% de espuma de asfalto é necessária.

Para melhorar o nível de confiança, amostras adicionais de 150 mm de diâmetro podem ser manufaturas em intervalos de 0,1% de adição de espuma de asfalto, variando de 2,2% a 2,5% de espuma de asfalto adicionada e curada com um teor de umidade equilibrado. (Testar amostras com um teor de umidade equilibrado elimina as forças de sucção que elevam os valores ITSDRY, com uma consequente redução nos valores de TSR.) A tabela e o gráfico abaixo mostram resultados típicos que seriam obtidos, sobrepostos pelos limites mínimos pertinentes de ITS_{EQUIL} e ITS_{SOAK}, exigidos para um material estabilizado com espuma de asfalto Classe 1 (ITS_{EQUIL} > 175 kPa e ITS_{SOAK} > 100 kPa)

Betume adicionado (%)	ITS_{EQUIL} (kPa)	ITS_{SOAK} (kPa)
2,2	198	91
2,3	211	132
2,4	205	148
2,5	195	145



Amostras de 150 mm Ø

O exemplo destaca o nível aumentado de confiança obtido ao tomar a decisão de adicionar 2,3% de espuma de asfalto, para garantir que as exigências para um material estabilizado com betume Classe 1 sejam atendidas.

Anexo A1.2.1

FOAMED BITUMEN MIX DESIGN - WORKSHEET

Project _____ Date _____

Sample / Mix No.: _____ Location _____

Material description : _____

Maximum dry density _____ Optimum moisture content

Percentage < 0.075mm _____ Grading: Coarse | Medium | Fine

Plasticity Index _____

Bitumen Source _____ Bitumen type _____

Active Filler Type _____ Filler Source _____

MOISTURE DETERMINATION

		Hygroscopic	Specimen manufacture Sample 1	Sample 2	After Curing Dry	Soaked
Pan No.						
Mass wet sample + pan	m1					
Mass dry sample + pan	m2					
Mass pan	mp					
Mass moisture	m1-m2 = Mm					
Mass dry sample	m2-mp= Md					
Moisture content	Mm/Mdx100=Mh					

Mass of air-dried sample placed in the mixer (kg) _____

Percentage of water added to sample for mixing: _____ Amount of water added : _____

Percentage water added to sample for compaction _____ Amount of water added : _____

Total percentage water added: _____ Total water added: _____

Foamed bitumen addition (%): _____ Active filler addition (%): _____

Foam water injection rate (%) _____

Temperatures (°C) Material: _____ Bitumen: _____ Water: _____

SPECIMEN DETAILS

Specimen ID						
Date Moulded						
Date removed from oven						
Date tested						
Diameter (mm)						
Individual height measurements (mm)						
Average height (mm)						
Mass after curing (g)						
Bulk density (kg/m^3)						
Average bulk density						
Dry density (kg/m^3)						

ITS TEST

Specimen condition	Unsoaked (ITS_{DRY} / ITS_{EQUIL})			Soaked (ITS_{WET} / ITS_{SOAK})		
Maximum load (kN)						
Internal temperature (°C)						
Deformation (mm)						
ITS (kPa)						
Average ITS (kPa)						
TSR (%)						

Anexo A1.2.2

FOAMED BITUMEN MIX DESIGN REPORT (Dry curing)

Project _____ Date _____

Sample number: _____ Location _____

Material description : _____

Maximum dry density _____ Optimum moisture content

Percentage < 0.075mm _____ Grading: | Coarse | Medium | Fine

Plasticity Index _____

Bitumen Source _____ Bitumen type _____

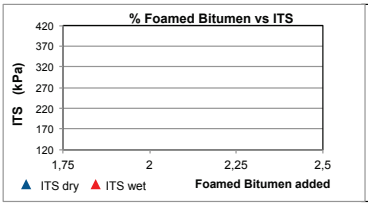
Active Filler Type _____ Filler Source _____

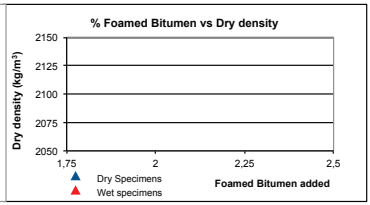
FOAMED BITUMEN STABILISED MATERIAL SPECIMENS

Compactive effort				**mm**	specimen diameter
Date moulded					
Date tested					
Foamed Bitumen added	(%)				
Active filler added	(%)				
Moulding moisture content	(%)				

TEST RESULTS

ITS_{DRY}	(kPa)				
Moisture content at break	(%)				
Dry Density	(kg/m^3)				
Average deformation	(mm)				
Temperature at break	(°C)				
ITS_{WET}	(kPa)				
Moisture content at break	(%)				
Dry Density	(kg/m^3)				
Average deformation	(mm)				
Temperature at break	(°C)				
Tensile Strength Retained	(%)				
Material classification					





Comments _____

A1.3 Procedimento do projeto de mistura para estabilização com emulsão betuminosa

Os procedimentos do projeto de mistura para estabilização com emulsão betuminosa descritos abaixo são realizados em amostras representativas de material com os seguintes principais objetivos:

- Determinar se o material é apropriado para estabilizar com emulsão betuminosa;
- Determinar se um filler ativo deve ser adicionado em conjunto com a emulsão betuminosa;
- Determinar as quantidades de emulsão betuminosa e de filler ativo que necessitam ser aplicadas para uma estabilização eficaz; e
- Obter um indicativo do comportamento (propriedades de engenharia) do material estabilizado.

Os vários testes executados em amostras não tratadas e tratadas são essencialmente “testes de rotina” que podem ser realizados pela maioria dos laboratórios equipados para testes normais de rotina de solos e asfalto.

A1.3.1 Amostragem e preparação

A1.3.1.1 Amostragem em campo

As amostras de grandes volumes são obtidas e poços de teste escavados como parte das investigações de campo (ou de poços e pedreiras onde materiais novos devem ser importados e estabilizados). Cada camada no pavimento superior (± 300 mm) deve ser amostrada em separado e, no mínimo, 200 kg de material recuperado de cada camada que provavelmente será incluída em alguma operação de reciclagem e, consequentemente, exigirá um projeto de mistura.

Observação:

- Amostras retiradas de camadas de material ligado (asfalto e materiais previamente estabilizados) devem ser pulverizadas in situ utilizando uma pequena fresadora (ou uma recicladora) para simular o nivelamento que será obtido quando o pavimento for reciclado.

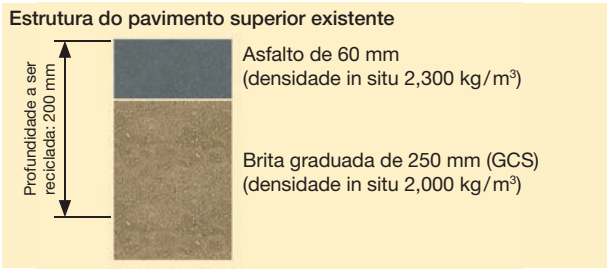
A1.3.1.2 Testes padrão do solo

Execute os seguintes testes padrão no material amostrado de cada camada individual ou fonte:

- Análise de peneira para determinar a granulometria (procedimento de lavagem de finos, ASTM D 422);
- Limites de Atterberg para determinar o índice de plasticidade (ASTM D 4318); e
- Relação umidade / densidade (AASHTO T-180).

A1.3.1.3 Mistura da amostra

Quando necessário, misture os materiais de amostras de diferentes camadas (e/ou material novo) para obter uma amostra combinada representando o material de toda a profundidade da reciclagem. A densidade in-situ dos vários materiais componentes deve ser considerada quando se misturam materiais, conforme ilustrado no exemplo mostrado abaixo.


Estrutura do pavimento superior existente
Profundidade a ser reciclada: 200 mm
Asfalto de 60 mm
(densidade in situ 2,300 kg/m³)
Brita graduada de 250 mm (GCS)
(densidade in situ 2,000 kg/m³)

Misture os materiais proporcionalmente à espessura da camada e à densidade in situ, conforme segue:

Material	Massa/m² (kg)	Proporção por massa (%)	Por amostra de 10 kg (g)
Asfalto (60 mm at 2.300 kg/m³)	0,06 x 2.300 = 138	138/418 = 0,33	0,33 x 10.000 = 3.300
GCS (140 mm at 2.000 kg/m³)	0,14 x 2.000 = 280	280/418 = 0,67	0,67 x 10.000 = 6.700
Total	418	1.00	10.000

Observação:

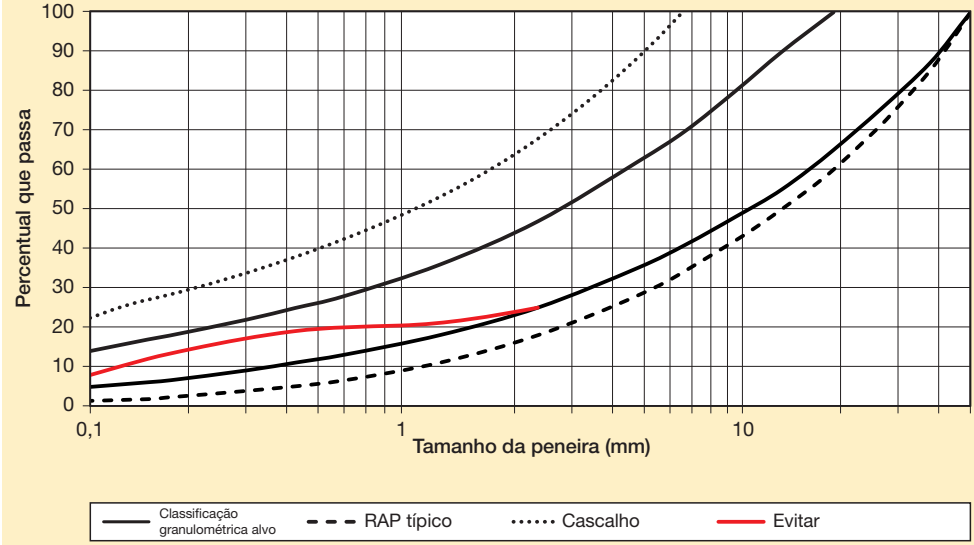
- Repita os testes padrão do solo listados na Seção A1.3.1.2 acima para determinar a granulometria, o índice de plasticidade e a relação umidade/densidade da amostra misturada.

A1.3.1.4 Granulometria (análise da peneira)

Trace a curva de classificação da amostra que será utilizada nos projetos da mistura. Inclua no gráfico a "granulometria alvo" da tabela abaixo. Se o material predominante for RAP ou cascalho natural, inclua a curva pertinente (também da tabela abaixo). Este gráfico indicará se a mistura adicional com o material recentemente importado pode ser necessária. Entretanto, se o gráfico incluir alguma "proeminência" nas frações entre de as peneiras de 0,075 mm e 2,0 mm (conforme mostrado na linha vermelha intitulada "Evitar" no gráfico abaixo), a amostra deve ser misturada com um material fino o suficiente apropriado (por exemplo 10% por volume de menos 5 mm de poeira da britadeira) para reduzir a magnitude da proeminência

Observação:

- Este exercício é aconselhável pois fornece uma indicação preliminar da resistência que pode ser esperada depois que o material for tratado com a emulsão betuminosa. (Um material mal classificado é difícil de compactar e a baixa densidade obtida afetará significativamente a resistência, especialmente sob condições de saturação).



Curvas de classificação granulométrica recomendadas

Tamanho da peneira (mm)	Percentual que passa em cada tamanho de peneira (%)			
	Granulometria recomendada		Cascalho natural	RAP típico
	Graúda	Fina		
50	100	100	100	100
37,5	87	100	100	85
26,5	76	100	100	72
19	65	100	100	60
13,2	55	90	100	50
9,5	48	80	100	42
6,7	41	70	100	35
4,75	35	62	88	28
2,36	25	47	68	18
1,18	18	36	53	10
0,6	12	27	42	6
0,425	10	24	38	4
0,3	8	21	34	3
0,15	3	16	27	1
0,075	2	10	20	0

A1.3.1.5 Proporção adequada representativa

Separar o material na amostra preparada nas seguintes quatro frações:

i. Retido na peneira de 19,0 mm;
ii. Passa na peneira de 19,0 mm, mas fica retido na peneira de 13,2 mm;
iii. Passa na peneira de 13,2 mm, mas fica retido na peneira de 4,75 mm; e
iv. Passa na peneira de 4,75 mm.

Reconstitua as amostras representativas de acordo com o tamanho da partícula determinado acima (para o exemplo do material grosso) para a porção que passa pela peneira de 19,0 mm. Substitua a porção retida na peneira de 19,0 mm por material que passa pela peneira de 19,0 mm e fica retido na peneira de 13,2. O exemplo na tabela abaixo explica o procedimento:

<table>
<tr><th colspan="2">Análise da peneira</th><th colspan="3">Quantidade de material a ser incluído na amostra de 10 kg</th></tr>
<tr><th>Tamanho da peneira (mm)</th><th>Percentual que passa (resultado da análise da peneira da amostra a granel)</th><th>Passa em 4,75 mm</th><th>Passa em 13,2 mm, e retido em 4,75 mm;</th><th>Passa em 19,0 mm, e retido em 13,2 mm;</th></tr>
<tr><td>19,0</td><td>90,5</td><td rowspan="3">(53,6/100 x 10.000) = 5.360 g</td><td rowspan="3">((72,3-53,6)/100 x 10.000) = 1.870 g</td><td rowspan="3">((100-72,3)/100 x 10.000) = 2.770 g</td></tr>
<tr><td>13,2</td><td>72,3</td></tr>
<tr><td>4,75</td><td>53,6</td></tr>
</table>

Se o material que passa na peneira de 19,0 mm, mas fica retido na peneira de 13,2 mm for insuficiente para substituir aquele retido na peneira de 19 mm, triture levemente o material retido na peneira de 19,0 mm para fornecer mais esta porção.

A1.3.1.6 Teor de umidade higroscópica

Duas amostras representativas secas com ar, sendo cada uma com aproximadamente 1 kg, são utilizadas para determinar o teor de umidade higroscópica do material (seco com ar). (Observação: Um tamanho maior de amostra deve ser utilizado para materiais mais graúdos). Pese as amostras secas com ar, o mais próximo de 0,1 g, e então as coloque em um forno com uma temperatura entre 105° C e 110° C até que as mesmas alcancem uma massa constante. O teor de umidade higroscópica (seca ao ar) é a perda de massa expressa como um percentual da massa seca da amostra. Determine a umidade higroscópica utilizando a Equação A1.3.1.

$$W_{air\text{-}dry} = \frac{(M_{air\text{-}dry} - M_{dry})}{100} \times 100$$ [Equação A1.3.1]

onde:

$W_{air\text{-}dry}$ = teor de umidade higroscópica [% por massa]
$M_{air\text{-}dry}$ = massa de material seco a ar [g]
M_{dry} = massa de material seco em forno [g]

A1.3.1.7 Quantidades de amostras

As diretrizes mostradas na seguinte tabela devem ser utilizadas para estimar a quantidade de material necessário para os respectivos testes

Teste	Massa da amostra
Relação umidade/densidade (modificada AASHTO T180)	40
Determinação da necessidade de filler ativo (espécimes de 100 mm Ø)	60
Indicação da adição ideal de betume (espécimes de 100 mm Ø)	80
Indicação da adição ideal de betume (espécimes de 150 mm Ø)	100
Testes padrão do solo (nivelamento, Limites de Atterberg , teor de umidade, etc.)	20

A1.3.2 Requisitos do filler ativo

A1.3.2.1 Efeito da plasticidade

A estabilização da emulsão betuminosa é normalmente realizada em combinação com uma pequena quantidade (1% por massa) de filler ativo (cimento ou cal hidratada) para aumentar a adesão do betume e reduzir a susceptibilidade à umidade. O índice da plasticidade (PI) do material é geralmente utilizado como uma diretriz para o uso de cal hidratada ou de cimento na mistura:

Índice de Plasticidade < 10	Índice de Plasticidade > 10
Realize os testes de ITS em amostras de 100 mm Ø para determinar a necessidade de adicionar o cimento ou cal hidratada, conforme descrito na seção A 1.3.2.2 abaixo.	Trate previamente o material com cal hidratada (valor de ICL) (O consumo inicial de cal (valor de ICL) deve ser primeiramente determinado aplicando-se o teste apropriado do pH.)

O pré-tratamento do material com PI > 10 exige que a cal e a água sejam adicionadas, no mínimo, 2 horas antes da adição da emulsão betuminosa. O material pré-tratado é colocado em um recipiente hermético para reter a umidade. O teor de umidade é então verificado e, se necessário, ajustado antes de adicionar o agente estabilizante de betume (conforme descrito na Seção A1.3.4).

Observação:

- Quando o material for previamente tratado com cal, os seguintes testes para a “Determinação dos Requisitos do Filler Ativo, descritos na Seção A1.3.2.2 abaixo não são necessários.

A1.3.2.2 Determinação dos requisitos do filler ativo

Quando PI < 10, a necessidade de um filler ativo e o tipo de filler ativo (cimento ou cal hidratada) apropriado para o material, devem ser determinados primeiramente pela realização de testes ITS nas amostras de 100 mm de diâmetro para diferentes misturas feitas a partir da mesma amostra. A quantidade de emulsão betuminosa adicionada a cada uma das três misturas é constante, utilizando as frações que passem pelas peneiras de 4,75 mm e 0,075 mm como uma diretriz, conforme mostrado na tabela a seguir:

Diretrizes para estimar a adição ideal de emulsão betuminosa (60% de betume residual)			
Fração que passa na peneira de 0,075 mm (%)	**Adição de emulsão betuminosa (betume residual) (% por massa de agregado seco)**		**Tipo característico de material**
	Fração que passa na peneira de 4,75 mm		
	< 50%	> 50%	
< 4	**3,3 (2,0)**	**3,3 (2,0)**	Asfalto reciclado (RA / RAP)
4 – 7	**3,7 (2,2)**	**4,0 (2,4)**	RA / Brita graduada / Cascalho natural / misturas
7 – 10	**4,0 (2,4)**	**4,7 (2,8)**	
> 10	**4,3 (2,6)**	**5,3 (3,2)**	Cascalho / areias

A primeira das três misturas não contém filler ativo, 1% de cimento é adicionado à segunda mistura e 1% de cal hidratada é adicionado à terceira mistura, sendo as três misturas tratadas com a mesma quantidade de espuma de asfalto. O material de cada um das três misturas é utilizado para manufaturar amostras com diâmetro de 100 mm, as quais são curadas e testadas para determinar os valores pertinentes de ITSDRY e ITSWET (descritos nas Seções A1.3.4 a A1.3.8 abaixo). O valor da Resistência à Tensão Retida (TSR) é usado então como o principal indicador da necessidade ou não de um filler ativo.

Quando o valor TSR da mistura sem a adição de filler ativo for superior a 60%, o projeto da mistura deve ser realizado sem o filler ativo. (Esta situação geralmente se restringe a materiais que consistem de brita de boa qualidade, frequentemente incluindo uma proporção significativa de material asfáltico recuperado (RAP).)

Quando o valor TSR da mistura sem filler ativo adicionado for inferior a 60%, a mistura com o tipo de filler ativo que produz um valor significativamente mais elevado de TSR (> 5%) indica uma preferência por cimento ou cal hidratada, e deve ser utilizada nos seguintes projetos de mistura. Se os valores de TSR para ambos os fillers ativos forem da mesma ordem (diferença < 5%) então qualquer tipo de filler ativo é apropriado.

Observação:

- Para determinar a sensibilidade do filler ativo, testes adicionais em amostras de 100 mm de diâmetro podem ser realizados utilizando o filler ativo preferido com uma taxa mais baixa de aplicação (por exemplo 0,75%). Entretanto, para não comprometer a flexibilidade da mistura, a taxa máxima permitida de aplicação de filler ativo é de 1,0% e somente deve ser ultrapassada quando cal hidratada for aplicada como um pré-tratamento para eliminar a plasticidade.

A1.3.3 Determinação da relação fluído / densidade

O Teor Ideal de Fluido (OFC) e a Densidade Seca Máxima (MDD) do material estabilizado com emulsão betuminosa são determinados utilizando o esforço padrão de compactação.

O OFC do material estabilizado com emulsão betuminosa é o percentual por massa da emulsão betuminosa, mais a umidade adicional exigida para se obter a densidade seca máxima no material tratado. Conforme descrito abaixo, o OFC é determinado adicionando-se um percentual constante de emulsão betuminosa enquanto se varia a quantidade de água adicionada.

Etapa 1. Meça a emulsão betuminosa como um percentual por massa do material seco ao ar de cada uma das cinco amostras preparadas (seguindo o procedimento descrito na Seção A 1.3.1.2). A percentagem de emulsão de betume adicionada normalmente se encontra entre 2 e 3% de betume residual (por exemplo para 3% de betume residual, adicione 5% de 60% de uma emulsão betuminosa).

Etapa 2. A emulsão betuminosa e a água são adicionadas ao material e misturadas até ficarem uniformes imediatamente antes da compactação.

Etapa 3. Determine o OFC e o MDD do material estabilizado de acordo com o procedimento de teste da relação umidade-densidade modificada (AASHTO T-180).

A1.3.4 Tratando a amostra com emulsão betuminosa

Prepare a amostra e trate com emulsão betuminosa utilizando o seguinte procedimento:

Etapa 1. Coloque a massa necessária da amostra (entre 20 kg e30 kg, preparada conforme descrito na Seção A1.3.1 acima) na misturadora pugmill Wirtgen WLM 30.

Etapa 2. Determine a massa seca da amostra utilizando a equação A1.3.2.

$$M_{sample} = \frac{(M_{air\text{-}dry})}{\left(1 + \left(\frac{W_{air\text{-}dry}}{100}\right)\right)}$$

[Equação A1.3.2]

onde:

M_{sample} = massa seca da amostra [g]
$M_{air\text{-}dry}$ = massa seca ao ar da amostra [g]
$W_{air\text{-}dry}$ = teor de umidade da amostra seca com ar [% por massa]

Etapa 3. Determine a massa necessária de filler ativo (cal ou cimento) a ser adicionada utilizando a Equação A1.3.3.

$$M_{cement} = \frac{C_{add}}{100} \times M_{sample}$$

[Equação A1.3.3]

onde:

M_{cement} = massa de cal ou cimento a ser adicionada [g]
C_{add} = percentual de cal ou cimento necessário [% por massa]
M_{sample} = massa seca da amostra [g]

Etapa 4. Determine a quantidade de emulsão betuminosa a ser adicionada utilizando a Equação A1.3.4.

$$M_{emul} = \frac{RB_{reqd}}{PRB} \times M_{sample}$$

[Equação A1.3.4]

onde:

M_{emul} = massa de emulsão betuminosa a ser adicionada [g]
RB_{reqd} = percentagem de betume residual necessária [%]
PRB = percentagem de betume residual na emulsão [% por massa]
M_{sample} = massa seca da amostra [g]

Etapa 5. Determine a quantidade de água a ser adicionada para obter o OFC do material utilizando a equação A1.3.5.

$$M_{water} = \left(\frac{(W_{OFC} - W_{air-dry})}{100} \right) x\ M_{sample} - M_{emul} \qquad \text{[Equação A1.3.5]}$$

onde:

M_{water}	= massa de água a ser adicionada	[g]
W_{OFC}	= teor ideal de fluído	[% por massa]
$W_{air-dry}$	= teor de umidade da amostra seca com ar	[% por massa]
M_{sample}	= massa seca da amostra	[g]
M_{emul}	= massa emulsão betuminosa adicionada	[g]

Etapa 6. Misture o material, o filler ativo, a emulsão betuminosa e água na misturadora até ficar uniforme.

Etapa 7. Transfira a emulsão betuminosa tratada para um recipiente hermético e vede imediatamente. Para minimizar a perda de umidade, manufature amostras de teste assim que possível seguindo o procedimento pertinente em amostras de 100 mm ou de 150 mm de diâmetro, conforme descrito nas seções A1.3.5.1 e A1.3.5.2 respectivamente.

Repita as etapas acima em, no mínimo, quatro misturas com teores de betume residual em intervalos de 0,2%.
As "Diretrizes para estimar a adição ideal de emulsão betuminosa" (Seção A1.3.2.2 acima) devem ser utilizadas para determinar o ponto médio da extensão de emulsão betuminosa a ser adicionada às quatro amostras.

Um exemplo. Se o material consistir de uma mistura de RAP e brita com 39% e 8% passar nas peneiras de 4,75 mm e 0,075 mm respectivamente, as diretrizes na Seção A1.2.2.2 indicam uma adição ideal de betume de 4,0 (2,4) %. A quantidade de espuma de asfalto (betume residual) a ser adicionada a cada amostra (todas com a mesma quantidade de filler ativo e com o mesmo teor ideal de umidade) é:

Amostra 1: 3,5 (2,1)%
Amostra 2: 3,8 (2,3)%
Amostra 3: 4,2 (2,5)%
Amostra 4: 4,5 (2,7)%

A1.3.5 Manufatura de amostras para teste

Os procedimentos descritos abaixo são para a manufatura de dois tamanhos diferentes de amostras utilizando diferentes procedimentos de compactação:

Tamanho da amostra e esforço de compactação aplicado no processo de manufatura		
Diâmetro da amostra	**Altura da amostra**	**Esforço de compactação**
100 mm	63,5 mm	Marshall modificado*
150 mm	95,0 mm	AASHTO modificado

* 75 sopros por superfície

As duas questões a seguir são normalmente levantadas:

1. **Qual o tamanho de amostra que deve ser manufaturado?** Conforme descrito na Seção A1.2.8 abaixo, os valores de ITS_{DRY} e ITS_{WET} são normalmente determinados a partir de amostras com diâmetro de 100 mm. Amostras com 150 mm de diâmetro podem ser substituídas por amostras de 100 mm de diâmetro para obter os mesmos valores. Contudo, quando se trata de material graúdo, (isto é, quando a curva de classificação tende na direção do lado graúdo da granulometria recomendada) recomenda-se manufaturar e testar amostras com 150 mm de diâmetro no lugar de amostras menores de 100 mm de diâmetro. Observação: Somente amostras com 150 mm de diâmetro são utilizadas para determinar os valores de ITS_{EQUIL} e ITS_{SOAK}.

2. **Podem ser utilizados outros métodos de compactação?** T Os procedimentos de compactação descritos abaixo são procedimentos padrão bem conhecidos, que podem ser realizados na maioria dos laboratórios em todo o mundo. Outros procedimentos podem ser utilizados (por exemplo, compactação giratória, martelo vibratório, mesa vibratória, etc.) desde que alcancem a mesma meta de densidade de compactação 100% Marshall para amostras de 100 mm ou 100% de densidade do mod. AASHTO T-180 para amostras de 150 mm de diâmetro

A1.3.5.1 Manufatura de amostras de 100 mm de diâmetro

Um mínimo de seis (6) amostras de 100 mm de diâmetro, 63,5 mm de altura, é manufaturado para cada amostra de material tratado, aplicando-se o esforço de compactação Marshall modificado, conforme descrito nas etapas seguintes:

Etapa 1 Prepare o molde e o martelo Marshall limpando o molde, o colarinho, a placa de base e a superfície do martelo de compactação. Observação: o equipamento de compactação não deve ser aquecido, mas mantido em temperatura ambiente.

Etapa 2. Pese material suficiente para obter uma altura compactada de 63,5 mm ± 1,5 mm (Aproximadamente 1.100 g para a maioria dos materiais). Empurre a mistura com uma espátula 15 vezes ao redor do perímetro e 10 vezes na superfície, deixando a superfície levemente arredondada.

Etapa 3. Compacte a mistura aplicando 75 sopros com o martelo de compactação. Deve-se tomar cuidado para garantira a queda livre contínua do martelo.

Etapa 4. Remova o molde e o colarinho do pedestal e inverta a amostra (vire). Substitua e pressione-a firmemente para garantir que a mesma está presa na placa da base. Compacte a outra superfície da amostra com 75 sopros adicionais.

Etapa 5. Após a compactação, remova o molde da placa base e extruda a amostra por meio de um macaco de extrusão. Meça a altura da amostra e ajuste a quantidade de material se a altura não estiver dentro dos limites de 1,5 mm.

Observação: Materiais graúdos são frequentemente danificados durante o processo de extrusão. Portanto, recomenda-se que as amostras sejam deixadas em seus moldes por 24 horas permitindo o desenvolvimento de uma resistência suficiente antes da extrusão

Repita as etapas 1 a 5 para a manufatura de, no mínimo, seis (6) amostras

Etapa 6. Pegue ±1 kg de amostras representativas após a compactação da segunda e da quinta amostra, e seque até formar uma massa constante. Determine a umidade para moldagem utilizando a Equação A1.3.6..

$$W_{mould} = \frac{(M_{moist} - M_{dry})}{M_{dry}} \times 100 \qquad \text{[Equação A1.3.6]}$$

onde:

W_{mould}	= teor de umidade para moldagem	[% por massa]
M_{moist}	= massa de material úmido	[g]
M_{dry}	= massa de material seco	[g]

A1.3.5.2 Manufatura de amostras de 150 mm de diâmetro

Um mínimo de seis (6) amostras de 150 mm de diâmetro, 95 mm de altura, MPE, é manufaturado para cada amostra de material tratado, aplicando-se o esforço de compactação AASHTO (T-180) modificado, conforme descrito nas etapas seguintes:

Etapa 1. Prepare o equipamento limpando o molde, o colarinho, a placa de base e a superfície do martelo de compactação. (Tanto moldes "Proctor" divididos ou padrão podem ser utilizados, sendo cada um deles adaptado com um espaçador de 32 mm colocado na placa base para obter amostras de 95 mm (±1.5 mm) de altura.)

Observação: O martelo de compactação AASHTO modificado apresenta as seguintes especificações::

Diâmetro do martelo:	50 mm
Massa:	4.536 kg
Distância de queda:	457 mm

Etapa 2. Compacte cada amostra aplicando um esforço de compactação AASHTO (T-180) modificado (4 camadas de aproximadamente 25 mm de espessura, com cada um recebendo 55 sopros do martelo de queda.)

Etapa 3. Apare cuidadosamente o material excessivo das amostras, conforme especificado no método de teste AASHTO T-180.

Etapa 4. Após a compactação, remova o molde da placa base e extruda a amostra por meio de um macaco de extrusão. Quando moldes divididos forem utilizados, separe os segmentos e remova a amostra.

Observação Materiais graúdos são frequentemente danificados durante o processo de extrusão. Portanto, recomenda-se que as amostras sejam deixadas em seus moldes por 24 horas permitindo o desenvolvimento de uma resistência suficiente antes da extrusão.

Quando moldes divididos forem utilizados, é aconselhável deixar a amostra no molde por 4 horas antes de separar o molde e extrair a amostra..

Repita as etapas 1 a 4 para manufaturar, no mínimo, seis (6) amostras

Etapa 5. Pegue ±1 kg de amostras representativas após a compactação da segunda e da quinta amostra, e seque até formar uma massa constante. Determine o teor de umidade para moldagem utilizando a Equação A1.2.6. (acima).

A1.3.6 Cura das amostras

Dois métodos de cura são descritos abaixo. O primeiro é um procedimento padrão para secar as amostras até obter uma massa constante. O segundo procedimento visa simular condições de campo em que o “teor de umidade equilibrado” é de aproximadamente 50% do OMC. Amostras de 100 mm e 150 mm de diâmetro podem ser curadas a seco (com massa constante) enquanto somente as amostras de 150 mm de diâmetro podem ser curadas com o teor de umidade equilibrado.

A1.3.6.1 Cura a seco

Coloque as amostras (tanto as com 100 mm como as de 150 mm de diâmetro) em um forno com tiragem forçada a 40° C e cure até obter uma massa constante (normalmente 72 horas).

Para determinar se a massa constante foi obtida, pese as amostras e coloque-as de volta no forno. Remova após 4 horas e pese novamente. Se a massa estiver constante, então continue com os testes. Se a massa não estiver constante, recoloque no forno e pese novamente após intervalos repetidos de 4 horas até obter uma massa constante.

Quando a massa constante for obtida, remova as amostras do formo e deixe-as esfriar até 25° C (± 2.0° C).

A1.3.6.2 Cura para simular condições do local

Coloque as amostras com 150 mm de diâmetro em um forno de tiragem forçada a 30° C por 24 horas (ou até o teor de umidade reduzir até aproximadamente 50% do OMC).

Retire as amostras do forno, e coloque cada uma em um saco plástico vedado (no mínimo, duas vezes o volume da amostra) e recoloque no forno a 40° C por mais 48 horas.

Remova as amostras do forno após 48 horas retirando os seus respectivos sacos plásticos, garantindo que a umidade nos sacos não entre em contato com a amostra. Deixe esfriar até 25° C (± 2.0° C).

A1.3.7 Preparando as amostras para testes

Após esfriar, determine a densidade total de cada amostra utilizando o seguinte procedimento:

Etapa 1. Determine a massa da amostra.

Etapa 2. Meça a altura da amostra em quatro locais igualmente espaçados ao redor da circunferência e calcule a altura média da amostra.

Etapa 3. Meça o diâmetro da amostra.

Etapa 4. Calcule a densidade total de cada amostra utilizando a Equação A1.3.7.

$$BD_{spec} = \frac{4 \times M_{spec}}{\pi \times d^2 \times h} \times 1{,}000{,}000 \qquad \text{[Equação A1.3.7]}$$

onde:

BD_{spec}	= densidade total da amostra	[kg/m^3]
M_{spec}	= massa da amostra	[g]
h	= altura média da amostra	[mm]
d	= diâmetro da amostra	[mm]

Exclua dos testes adicionais todas as amostras cuja densidade total for diferente da densidade média total de todas as seis (6) amostras em mais de 2,5%.

Etapa 5. Coloque metade das amostras (normalmente 3) embaixo da água em uma banheira de imersão por 24 horas a 25° C (± 2° C). Após 24 horas, remova as amostras da água, seque a superfície e teste imediatamente.

A1.3.8 Determinação da resistência à tensão indireta (ITS) das amostras

A ITS de uma amostra é determinada medindo-se a última carga a falhar aplicada ao eixo diametral a uma taxa constante de deformação de 50,8 mm / minuto. Assegure-se de que a temperatura das amostras é de 25° C (± 2° C) e siga o procedimento descrito abaixo:

Etapa 1. Coloque a amostra sobre o gabarito de ITS. (Garanta que as faixas de carregamento corretas são apropriadas para o diâmetro da amostra). Posicione a amostra de maneira a que as faixas de carregamento fiquem paralelas e centralizadas no plano diametral vertical.

Etapa 2. Coloque a placa de transferência sobre a faixa de sustentação superior e posicione o conjunto do gabarito sob a rampa de carregamento do dispositivo de teste da compressão.

Etapa 3. Aplique carga à amostra, sem choque, a uma taxa de avanço de 50,8 mm por minuto até alcançar a carga máxima.

Etapa 4. Registre a carga máxima P (em kN), exatamente em 0,1 kN.

Etapa 5. Registre o deslocamento na quebra até o mais próximo de 0,1 mm.

Etapa 6. Quebre a amostra no meio e registre a temperatura do seu centro.

Etapa 7. Quebre uma das amostras não submersas e seque até obter uma massa constante. Determine o teor de umidade curada utilizando a Equação A1.3.8.

$$W_{spec} = \frac{(M_{moist} - M_{dry})}{M_{dry}} \times 100 \quad \text{[Equação A1.3.8]}$$

onde:
W_{spec} = teor de umidade da amostra [% por massa]
M_{moist} = massa de material úmido [g]
M_{dry} = massa de material seco [g]

Determine a densidade seca de cada amostra utilizando a Equação A1.3.9.

$$DD_{spec} = BD_{spec} \times \left(1 - \frac{W_{spec}}{100}\right) \quad \text{[Equação A1.3.9]}$$

onde:
DD_{spec} = densidade seca da amostra [% por massa]
BD_{spec} = densidade total da amostra [g]
W_{spec} = teor de umidade da amostra [g]

Etapa 8. Quebre uma das amostras saturadas com água e seque até obter uma massa constante (entre 105o e 110o C).
Determine o teor de umidade curada após a saturação com água utilizando a Equação A1.3.8.

Etapa 9. Calcule o valor da ITS de cada amostra o mais próximo de 1 kPa utilizando a equação A1.3.10.

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 1{,}000{,}000$$ [Equação A1.3.10]

onde:

ITS	= Resistência à Tensão Indireta	[kPa]
P	= carga máxima aplicada	[kN]
h	= altura média da amostra	[mm]
d	= diâmetro da amostra	[mm]

Etapa 10. Utilize a Planilha no Anexo A1.3.1 para registrar os dados e o formulário no Anexo A1.3.2 para relatar os resultados.

Etapa 11. Somente para amostras curadas a seco, calcule o valor da Resistência à Tensão Retida (TSR) da amostra, utilizando a Equação A1.3.11.

$$TSR = \frac{\text{Ave } ITS_{WET}}{\text{Ave } ITS_{DRY}} \times 100$$ [Equação A1.3.11]

onde:

TSR	= Resistência à Tensão Retida	[%]
Ave ITS_{WET}	= valor ITS_{WET} médio	[kPa]
Ave ITS_{DRY}	= valor ITS_{DRY} médio	[kPa]

Observação. Para diferenciar entre os resultados obtidos de diferentes métodos de cura, a terminologia mostrada na tabela abaixo deve ser adotada para evitar confusões.

Termo	Diâmetro da amostra	Método de cura	Teor de umidade
ITS_{DRY}	100 mm ou 150 mm	72 h sem vedação	<1%
ITS_{WET}		24 h submersa em água	Saturado
ITS_{EQUIL}	somente 150 mm	24 h sem vedação, 48 h em uma bolsa vedada	± 50% de OMC
ITS_{SOAK}		24 h submersa em água	Semissaturado

A1.3.9 Interpretação dos resultados do teste da resistência à tensão indireta (ITS)

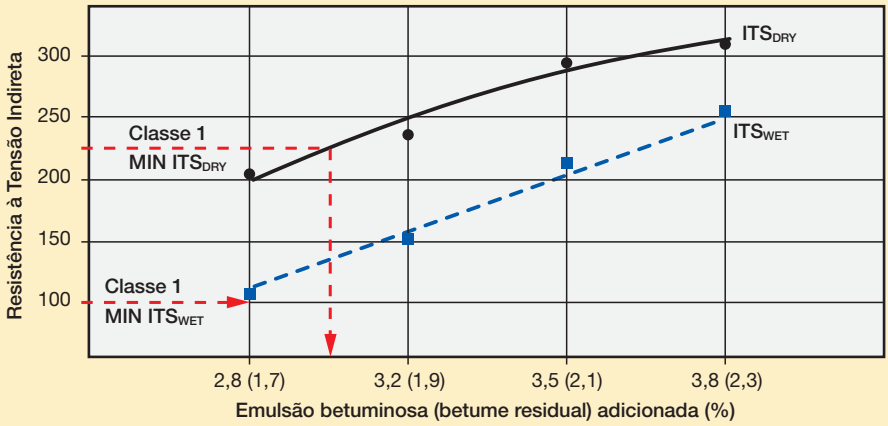
Faça um gráfico dos resultados respectivos dos testes de ITS com saturação e sem saturação em comparação com a adição pertinente de emulsão betuminosa, conforme mostrado no exemplo abaixo. Se os resultados de dois métodos de cura diferentes forem obtidos, cada um deles deve ser colocado em um gráfico separado.

A emulsão betuminosa adicionada que cumprir com o valor mínimo de ITS para a classificação do material é selecionada como o principal indicador da quantidade mínima de emulsão betuminosa a ser adicionada. A avaliação da engenharia é então utilizada para determinar a quantidade de emulsão betuminosa que deve ser adicionada para obter confiança suficiente, com base na variabilidade dos resultados de teste (a "bondade do ajuste" da curva de regressão ou linha através dos resultados dos teste em gráfico).

O exemplo abaixo explica o processo:

A tabela e gráfico dos resultados dos testes de ITS são valores típicos de ITS obtidos a partir de um projeto de mistura utilizando amostras de 100 mm de diâmetro para um material misturado com RAP / brita estabilizado com 60% de emulsão betuminosa residual.

Emulsão betuminosa adicionada (betume residual) (%)	ITS_{DRY} (kPa)	ITS_{WET} (kPa)	TSR (%)
2,8 (1,7)	204	109	53,4
3,2 (1,9)	234	151	64,5
3,5 (2,1)	282	214	75,9
3,8 (2,3)	327	253	77,4



Amostras de 100 mm Ø

A curva através dos quatro pontos ITSDRY aproxima a relação entre ITSDRY e a emulsão betuminosa adicionada (betume residual). A linha através dos quatro pontos ITSWET aproxima a relação entre ITSWET e o betume adicionado. As linhas finas pontilhadas indicam que a adição entre 3,0 (1,8%) de emulsão betuminosa (betume residual) é necessária para atender aos requisitos para um material estabilizado com espuma de asfalto Classe 1 (ITSDRY > 225 kPa e ITSWET > 100 kPa). Com base nos resultados do teste de ITS e os valores correspondentes de TSR, o nível de confiança pode ser aumentado selecionando uma adição de emulsão betuminosa que atenda aos requisitos. Por exemplo, selecionar uma adição de emulsão betuminosa de 3,5 (2,1)% (betume residual) aumentará significativamente a probabilidade de o material estabilizado alcançar os valores mínimos de ITSDRY e ITSWET sob condições de campo.

Anexo A1.3.1

BITUMEN EMULSION MIX DESIGN - WORKSHEET

Project _____ Date _____

_____

Sample / Mix No.: _____ Location _____

Material description : _____

Maximum dry density _____ Optimum fluid content

Percentage < 0.075mm _____ Grading: Coarse | Medium | Fine

Plasticity Index _____

Emulsion Source _____ Emulsion type _____

Residual bitumen (%) _____

Active Filler Type _____ Filler Source _____

MOISTURE DETERMINATION			Specimen manufacture		After Curing	
		Hygroscopic	Sample 1	Sample 2	Dry	Soaked
Pan No.						
Mass wet sample + pan	m1					
Mass dry sample + pan	m2					
Mass pan	mp					
Mass moisture	m1-m2 = Mm					
Mass dry sample	m2-mp= Md					
Moisture content	Mm/Mdx100=Mh					

Mass of air-dried sample placed in the mixer (kg) _____

Percentage of water added to sample for mixing: _____ Amount of water added : _____

Total percentage water added: _____ Total water added: _____

Bitumen emulsion addition (%): _____ Active filler addition (%): _____

Residual bitumen addition (%) _____

Temperatures (°C) Material: _____ Emulsion: _____ Water: _____

SPECIMEN DETAILS						
Specimen ID						
Date Moulded						
Date removed from oven						
Date tested						
Diameter (mm)						
Individual height measurements (mm)						
Average height (mm)						
Mass after curing (g)						
Bulk density (kg/m^3)						
Average bulk density						
Dry density (kg/m^3)						

ITS TEST						
Specimen condition	**Unsoaked (ITS_{DRY} / ITS_{EQUIL})**			**Soaked (ITS_{WET} / ITS_{SOAK})**		
Maximum load (kN)						
Internal temperature (°C)						
Deformation (mm)						
ITS (kPa)						
Average ITS (kPa)						
TSR (%)						

Anexo A1.3.1

BITUMEN EMULSION MIX DESIGN REPORT (Dry curing)

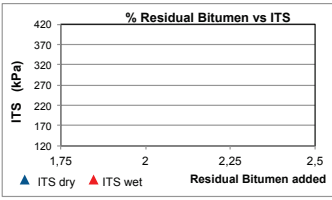
Project			Date		
Sample number:			Location		
Material description :					
Maximum dry density			Optimum fluid content		
Percentage < 0.075mm		Grading:	Coarse	Medium	Fine
Plasticity Index					
Bitumen Emulsion Type					
Emulsion Supplier			Residual Bitumen (%)		
Active Filler Type			Filler Source		

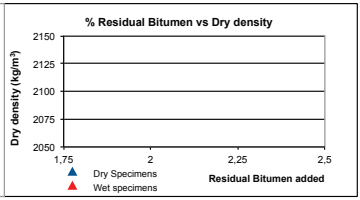
BITUMEN EMULSION STABILISED MATERIAL SPECIMENS

Compactive effort				**mm**	specimen diameter
Date moulded					
Date tested					
Bitumen emulsion added	(%)				
Residual bitumen added	(%)				
Active filler added	(%)				
Moulding moisture content	(%)				

TEST RESULTS

ITS_{DRY}	(kPa)				
Moisture content at break	(%)				
Dry Density	(kg/m^3)				
Average deformation	(mm)				
Temperature at break	(°C)				
ITS_{WET}	(kPa)				
Moisture content at break	(%)				
Dry Density	(kg/m^3)				
Average deformation	(mm)				
Temperature at break	(°C)				
Tensile Strength Retained	(%)				
Material classification					





Comments

A1.4 Testando amostras de campo de materiais estabilizados com betume (BSMs)

A1.4.1 Amostragem em campo

Amostras (± 100 kg) de material tratado a ser obtido no local:

- Quando o material for misturado in situ, a amostra deve ser retirada imediatamente atrás da recicladora de toda a espessura do material tratado (antes de ser compactado).
- Quando o material for misturado em uma usina e colocado por uma pavimentadora, as amostras podem ser retiradas da usina de mistura ou do local, seguindo os procedimentos padrão de amostragem.

Coloque cada amostra em um recipiente hermético e vede para evitar a perda de umidade. O recipiente ou a bolsa utilizados para a amostragem devem ser suficientemente grandes para garantir que o material permanecerá solto e não compacte dentro do recipiente.

As amostras de campo devem ser transportadas ao laboratório em duas horas a partir da amostragem e os espécimes de teste manufaturados em quatro horas a partir da sua amostragem.

A1.4.2 Preparação da amostra

Prepare a amostra passando-a por uma peneira de 19 mm. Descarte a fração retida na amostra de 19 mm. Coloque a amostra em um recipiente hermético e verifique se a temperatura está entre 22° C e 25° C. Se a temperatura do material não estiver dentro desta faixa, coloque a amostra inteira no gabinete de ar (ou similar) até o material atingir esta faixa de temperatura.

A1.4.3 Ajuste do teor de umidade

Como as amostras de campo normalmente se encontram na faixa de 60% a 80% de Teor Ideal de Umidade (OMC), água suficiente deve ser adicionada à amostra para alcançar o OMC antes que os espécimes do teste sejam manufaturados. (Devido à variabilidade do material reciclado, raramente o OMC será conhecido com certeza. A quantidade de água necessária para a amostra alcançar o OMC deve ser determinada (para cada amostra) de acordo com o procedimento descrito na Seção A 1.4.3.2 abaixo.)

A1.4.3.1 Quando a densidade seca máxima (MDD) e o teor ideal de umidade (OMC) do material forem conhecidos com certeza

- Determine o teor de umidade da amostra de campo;
- Ajuste o teor de umidade de 10 kg da amostra para obter o OMC, misture por inteiro e coloque em um recipiente hermético; então
- Vá até a Seção 4 e manufature amostras de 100 mm de diâmetro para testes.

A1.4.3.2 Quando a densidade seca máxima (MDD) e o teor ideal de umidade (OMC) do material não forem conhecidos

Ajuste o teor de umidade da amostra para chegar ao OMC.

Etapa 1. Prepare o molde e o martelo Marshall limpando o molde, o colarinho, a placa de base e a superfície do martelo de compactação. (Observação: o equipamento de compactação não deve ser aquecido, mas mantido em temperatura ambiente.)

Etapa 2. Pese 1.100 g do material e coloque no molde. Empurre a mistura com uma espátula 15 vezes ao redor do perímetro e 10 vezes na superfície, deixando a superfície levemente arredondada. Certifique-se de que o material não perca a umidade ou segregue durante a colocação no molde e vede a amostra remanescente no recipiente hermético.

Etapa 3. Compacte o material aplicando 75 sopros com o martelo de compactação. Deve-se tomar cuidado para garantir a queda livre contínua do martelo. Remova o molde e o colarinho do pedestal e inverta a amostra (vire). Substitua e pressione-a firmemente para garantir que a mesma está presa na placa da base. Compacte a outra superfície da amostra com 75 sopros adicionais.

Etapa 4. Após a compactação, remova o molde da placa base e extruda a amostra por meio de um macaco de extrusão.

Etapa 5. Determine a massa da amostra.

Etapa 6. Meça a altura da amostra em quatro locais igualmente espaçados ao redor da circunferência e calcule a altura média da amostra.

Etapa 7. Meça o diâmetro da amostra.

Etapa 8. Calcule a densidade aparente "provisória" da amostra utilizando a equação A1.4.1.

$$BD_{INT} = \frac{4 \times M_{SPEC}}{\pi \times d^2 \times h} \times 100\,000$$ [Equação A1.4.1]

onde

BD_{INT}	= densidade aparente provisória	[kg/m³]
M_{SPEC}	= massa da amostra	[g]
h	= altura média da amostra	[mm]
d	= diâmetro da amostra	[mm]

Então, utilizando a Equação A1.4.2, calcule a "verdadeira" densidade total excluindo a quantidade total de umidade que foi adicionada:

$$BD = \frac{BD_{INT}}{\left(100 + \frac{W_{ADD}}{100}\right)} \times 100$$ [Equação A1.4.2]

onde

BD	= densidade aparente	[kg/m³]
BD_{INT}	= densidade aparente provisória (de Equação 1)	[kg/m³]
W_{ADD}	= umidade total adicionada à amostra	[%]

Etapa 9. Faça um gráfico da densidade aparente em comparação com a adição de água. (O primeiro ponto no gráfico é a adição zero de água.)

Etapa 10. Pese outras 1.100 g de material. Adicione 5,5 ml de água (0,5% por massa) e misture por completo antes de colocar no molde, seguindo o procedimento descrito na Etapa 2.

Etapa 11. Repita as Etapas 3 a 9 e compare a densidade aparente com aquela obtida da amostra anterior. Continue a seguir as Etapas 3 a 10 fazendo amostras com água adicional até a densidade aparente reduzir a partir da amostra anterior

Etapa 12. A quantidade de água adicionada à amostra que retorna a densidade aparente mais alta (em percentual) é então adicionada a 10 kg da amostra remanescente. Misture completamente o material e recoloque-o no recipiente hermético.

Observação. Se ocorrer umidade fora do molde antes de um momento decisivo na curva ser alcançado, então a quantidade de adição de água para obter a densidade máxima é a quantidade de água adicionada ao material em que a infiltração ocorreu, menos 0,5%.

A1.4.4 Manufatura de amostras de 100 mm de diâmetro para testes

Utilizando as medidas de altura das amostras da Etapa 6 (Seção A1.4.3 acima) como uma diretriz, determine a massa de material necessária para obter uma altura da amostra de 63,5 mm (±1,5 mm). Então, siga os procedimentos descritos nas Etapas 2 a 4, utilizando a massa revisada do material para manufaturar seis (6) amostras, cada uma com altura de 63,5 mm (±1,5 mm).

Observação. Quando o OMC da amostra for conhecido e o procedimento de ajuste da umidade descrito acima na Seção 3 não foi realizado, siga as etapas 2 e 3 (Seção A1.4.3) utilizando 1.100 g da amostra preparada de acordo com o OMC. Meça a altura da amostra (Etapa 6) e, se necessário ajuste a massa para obter uma altura de 63,5 mm (±1,5 mm) para a amostra. Então, siga o procedimento descrito nas Etapas 2 a 4, utilizando a massa revisada do material para manufaturar seis (6) amostras, cada uma com altura de 63,5 mm (±1,5 mm).

Depois que todas as amostras foram manufaturadas, utilize o material de amostragem remanescente para determinar o teor de umidade para moldagem, seguindo os procedimentos padrão para secagem em forno.

A1.4.5 Cura das amostras

Coloque as amostras em um forno com tiragem forçada a 40° C e cure até obter uma massa constante (normalmente 72 horas).

Para determinar se a massa constante foi obtida, pese as amostras e coloque-as de volta no forno. Remova após 4 horas e pese novamente. Se a massa estiver constante, então continue com os testes. Se a massa não estiver constante, recoloque no forno e pese novamente após intervalos repetidos de 4 horas até obter uma massa constante.

Quando a massa constante for obtida, remova as amostras do formo e deixe-as esfriar até 25° C (± 2.0° C).

Após esfriar, determine a densidade aparente de cada amostra seguindo as Etapas 5 a 8 descritas na Seção A1.4.3.

Exclua dos testes adicionais todas as amostras, cuja densidade total for diferente da densidade média total de todas as seis (6) amostras em mais de 2,5%.

Coloque metade das amostras (normalmente 3) embaixo da água em uma banheira de imersão por 24 horas a 25° C (± 2° C). Após 24 horas, remova as amostras da água, seque a superfície e teste imediatamente.

A1.4.6 Determinação da resistência à tensão indireta (ITS)

A ITS é determinada medindo a carga de ruptura a falhar de uma amostra sujeita a uma taxa constante de deformação de 50,8 mm / minuto no seu eixo diametral. Assegure-se de que a temperatura das amostras é de 25° C (± 2° C) e siga o procedimento descrito abaixo:

Etapa 1. Coloque a amostra sobre o gabarito de ITS. Posicione a amostra de maneira a que as faixas de carregamento fiquem paralelas e centralizadas no plano diametral vertical.

Etapa 2. Coloque a placa de transferência sobre a faixa de sustentação superior e posicione o conjunto do gabarito sob a rampa de carregamento do dispositivo de teste da compressão.

Etapa 3. Aplique carga à amostra, sem choque, a uma taxa de avanço de 50,8 mm por minuto até alcançar a carga máxima.

Etapa 4. Registre a carga máxima P (em kN), exatamente em 0,1 kN.

Etapa 5. Registre o deslocamento na quebra até o mais próximo de 0,1 mm.

Etapa 6. Quebre a amostra no meio e registre a temperatura do seu centro.

Etapa 7. Quebre uma das amostras secas e uma úmida e determine o teor de umidade seguindo os procedimentos padrão de secagem em forno.

Etapa 8. Calcule o valor da ITS de cada amostra o mais próximo de 1 kPa utilizando a equação A1.4.3:

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 100\,000$$ [Equação A1.4.3]

onde:

ITS	= Resistência à Tensão Indireta	[kPa]
P	= carga máxima aplicada	[kN]
h	= altura média da amostra	[mm]
d	= diâmetro da amostra	[mm]

Então, utilizando a Equação A1.4.2, calcule a "verdadeira" densidade total excluindo a quantidade total de umidade que foi adicionada:

Etapa 9. Use o formulário na página a seguir para relatar os resultados.

ITS DETERMINATION for BSM FIELD SAMPLE

PROJECT ..... Position .....
Sample No.: ..... Date .....
Description : .....

FIELD TREATMENT
Maimum dry density ..... (If known) Optimum moisture content .....
Bitumen type / source ..... Bitumen applied (%) .....
Active filler type / source ..... Active filler applied (%) .....

MOISTURE DETERMINATION		Specimen manufacture		After Testing	
		Field	Moulding	Dry	Soaked
Pan No.					
Mass wet sample + pan	m1				
Mass dry sample + pan	m2				
Mass pan	mp				
Mass moisture	m1 - m2 = Mm				
Mass dry sample	m2 - mp = Md				
Moisture content	Mm / Md x 100 = Mh				

SPECIMEN DETAILS	**DRY**			**SOAKED**		
Date Moulded						
Date removed from oven						
Specimen ID						
Diameter (mm)						
Individual Thickness Readings (mm)						
Avgerage Thickness (mm)						
Mass after curing (g)						
Bulk density (kg/m^3)						
Avg bulk density (kg/m^3)						
Moisture content (%)						
Dry density (kg/m3)						
Avg dry density (kg/m^3)						

ITS TESTING

Condition	**Dry (ITS_{DRY})**			**Soaked (ITS_{WET})**		
Date tested						
Maximum load (kN)						
Temperature (˚C)						
Deformation (mm)						
Tensile strength (kPa)						
Avg tensile strength (kPa)						

A1.5 Determinando a resistência das amostras do núcleo do BSM

As amostras do núcleo podem ser extraídas de toda a espessura da camada concluída e testadas quanto aos seus valores de ITS. Devido à resistência relativamente baixa de um BSM, os núcleos de 150 mm de diâmetro são preferíveis àqueles de 100 mm de diâmetro normalmente extraídos para HMA. Os núcleos não podem ser extraídos com sucesso até que o BSM desenvolva resistência suficiente e o período de retardo é ditado pela taxa de perda de umidade do material, o que é, basicamente, uma função das condições meteorológicas e da espessura da camada. Quando as condições são quentes e secas, os núcleos podem ser extraídos de uma camada com 150 mm de espessura de espuma de BSM-espuma após 14 dias. O período de retardo para a emulsão de BSM-emulsão é também influenciado pela estabilidade da emulsão e os retardos de 30 dias são normais.

A1.5.1 Extraindo as amostras do núcleo

O barril do núcleo utilizado para extrair amostras de BSM deve estar em boas condições. A quantidade de água adicionada quando da fresagem deve ser mantida em um mínimo absoluto e a taxa de penetração mantida suficientemente baixa para evitar a erosão e danos. Após a extração as amostras do núcleo devem ser embrulhadas individualmente em um pano macio e embaladas cuidadosamente para serem transportadas ao laboratório.

A1.5.2 Cortando amostras do núcleo

Use uma serra giratória equipada com uma lâmina com ponta de diamante de grande diâmetro para cortar amostras da porção do núcleo que sofreu menos danos durante a extração e a manipulação. A espessura (altura) das amostras cortadas do núcleo é ditada pelo diâmetro:

- Núcleos de 100 mm de diâmetro: 63 mm
- Núcleos de 150 mm de diâmetro: 95 mm

Sempre que possível mais de um espécime deve ser cortado de cada amostra do núcleo.

A1.5.3 Cura das amostras do núcleo

Coloque as amostras em um forno com tiragem forçada a 40° C e cure até obter uma massa constante (normalmente 72 horas). Quando o seu valor ITS_{WET} tiver que ser determinado, coloque as amostras em uma banheira de imersão por 24 horas.

A1.5.4 Determinação da densidade aparente

Siga os procedimentos descritos na Seção A1.2.7 para determinar a densidade aparente de cada amostra do núcleo.

A1.5.5 Determinação da resistência à tensão indireta (ITS)

Siga os procedimentos descritos na Seção A1.2.8 para testar as amostras do núcleo, determinar os seus valores ITS_{DRY} e ITS_{WET} e o valor TSR resultante. Estes valores são então utilizados para determinar se o material atendem aos requisitos mínimos especificados.

Observação. Quando os resultados de ITS das amostras manufaturadas a partir de amostras de campo entrarem em conflito com aqueles obtidos de amostras do núcleo, os resultados das amostras do núcleo devem ser considerados como os valores corretos.

A1.6 Requisitos dos equipamentos de laboratório

A1.6.1 Equipamento de laboratório para testes de solos

Descrição	Quantidade
Preparação das amostras	
Desarenador (aberturas de 25 mm)	1
Recipientes para desarenadores	3
Peneiras de 450 mm de diâmetro	
19,0 mm	1
13,2 mm	1
4,75 mm	1
Containers herméticos de 20 litros (Baldes plásticos com tampas)	20
Balança mecânica de 50 kg	1
Análise da peneira (classificação granulométrica)	
Peneiras de 200 mm de diâmetro	
50,0 mm	1
37,5 mm	1
25,0 mm	1
19,0 mm	1
12,5 mm	1
9,5 mm	1
4,75 mm	1
2,36 mm	1
1,18 mm	1
0,60 mm	1
0,30 mm	1
0,15 mm	1
0,075 mm	3
Recipiente	1
Tampa	1
Balança eletrônica (15 kg ± 0.1 g)	1
Forno de secagem com tiragem forçada (capacidade mínima de 240 litros)	1
Recipientes (±300 mm Ø)	10
Escova de peneira	1
<u>Equipamento opcional</u>	
Agitador mecânico de peneira	1
Limites de Atterberg (plasticidade)	
Dispositivo de Limite de Líquido Casagrande	1
Ferramentas de ranhurar	1
Bacias para mistura (±100 mmØ))	2
Espátula	1
Frasco de lavagem (250 ml)	1
Timer	1
Chapa de vidro (300 mm x 300 mm)	1
Jarras de vidro (100 ml)	50
Forno de secagem (uso do forno na seção Análise de Peneira)	1

Descrição	Quantidade
Relação umidade / densidade AASHTO modificado (T-180)	
Molde de 150 mm Ø (incluindo placa de base, espaçador e colarinho)	18
Martelo de compactação (4.536 kg de massa com 457 mm de queda e 50 mm)	1
Balança eletrônica (12 kg ±0.1 g)	1
Vasilha de mistura (± 0,5 m x 0,5 m x 0,3 m)	1
Colher de pedreiro para mistura	1
Cilindro de medição plástico de 1 litro	1
Régua de pedreiro em aço (para aparas)	1
Recipientes para o teor de umidade (capacidade de meio litro)	50
Forno de secagem com tiragem direta (capacidade para 400 litros)	1
<u>Equipamento opcional</u> Compactador mecânico com placa de base rotativa	1
Índice de suporte Califórnia	
moldes 0 de 150 mm (incluindo placa de base perfurada e pesos de sobrecarga)	30
Martelo de compactação (massa de 2,495 kg com queda de 305 mm e diâmetro de 50 mm)	1
Medidor de dilatação	1
Banheira de imersão (2 m x 1 m x 0,4 m)	1
Máquina de teste da compressão	1

A1.6.2 Equipamento de laboratório adicional para estabilização de cimento (ou cal)

Observação: Este equipamento é necessário ALÉM da lista mostrada em A1.6.1, Equipamento de laboratório para testes de solos.

Descrição	Quantidade
Compactação	
Moldes divididos e colarinho de 150 mm Ø em aço	3
Cura de amostras	
Bandejas perfuradas de 250 mm x 350 mm	12
Forno de secagem com tiragem forçada (capacidade para 400 litros)	1
Sacos plásticos (± 10 litros)	500
Balança eletrônica (10 kg ±0.1 g)	1
Banheira de água com controle de temperatura (Observação. A banheira de imersão de CBR pode ser utilizada se a temperatura ambiente for constante em ± 25 graus C)	1
Resistência à Tensão Indireta (ITS)	
Gabarito de teste ITS para amostras de 150 mm Ø .	1
Máquina de teste da compressão* (taxa de carregamento de 50.8 mm / min)	1
Teste de resistência à compressão não confinada	
Placa de transferência de 150 mm carga 0	1
Máquina de teste da compressão* (taxa de carregamento de 153 kN / min)	1

Descrição	Quantidade
Equipamentos Auxiliares	
Termômetro Teltru (250° C) (para banheiras e fornos)	3
Pá (300 mm)	1
Luvas (resistentes ao calor)	1
Pinceis de pintura de 500mm	2
Vassoura com cabo (macia)	1
Martelo (2 kg)	1
Graxa de silicone (100 g)	1
Trapos para limpeza	1
Corda	1
Caneta marcadora (ou tinta) (para marcar as amostras)	1
Concha para grãos ou similar	2
Termômetro eletrônico	1
Limpador para mãos	1
* Observação. A mesma máquina de teste da compressão utilizada no teste de CBR pode ser utilizada se equipada com uma taxa de carga ajustável	

A1.6.3 Equipamento de laboratório adicional para estabilização de betume

Observação: Este equipamento é necessário ALÉM da lista mostrada em A1.6.1, Equipamento de laboratório para testes de solos.

Descrição	Quantidade	Descrição	Quantidade
Somente projetos de mistura de espuma de asfalto		**Teste de resistência à tensão indireta (ITS)**	
Unidade de laboratório Wirtgen WLB10 S (completa com compressor de ar)	1	Gabarito de teste ITS para amostras de 100 mm Ø	1
		Gabarito de teste ITS para amostras de 150 mm Ø	1
		Máquina de teste da compressão*	1
Equipamento mecânico de mistura		**Equipamentos Auxiliares**	
Misturadora pugmill Wirtgen WLM 30	1	Termômetro Teltru (250° C) (para banheiras e fornos)	3
		Pá (300 mm)	1
		Luvas (resistentes ao calor)	1
		Pinceis de pintura de 500 mm	2
Manufatura de amostra de 100 mm Ø		Vassoura com cabo (macia)	1
Compactador Marshall (Manual ou automático com pedestal de madeira pedestal & martelo)	1	Martelo (2 kg)	1
		Graxa de silicone (100 g)	1
Moldes de 100 mm Ø (com colarinho e placa de base)	24	Trapos para limpeza	1
		Corda	1
Macaco de extrusão	1	Caneta marcadora (ou tinta) (para marcar as amostras)	1
Calibres Vernier (25 mm)	1	Concha para grãos ou similar	2
		Termômetro eletrônico	1
		Limpador para mãos	1
Cura de amostras		* Observação. A mesma máquina de teste da compressão utilizada no teste de CBR pode ser utilizada se equipada com uma taxa de carga ajustável	
Bandejas perfuradas de 250 mm x 350 mm	12		
Forno de secagem com tiragem forçada (capacidade para 400 litros)	1		
Sacos plásticos (± 10 litros)	500		
Balança eletrônica (10 kg ±0.1 g)	1		
Banheira de água com controle de temperatura	1		
(Observação: A banheira de imersão de CBR pode ser utilizada se a temperatura ambiente for constante em ± 25 graus C)			

Apêndice 2 – Determinando a capacidade estrutural a partir de informações do tráfego

A2.1	Terminologia associada ao tráfego	308
A2.2	Classificação da carga de tráfego	309
A2.3	Estimativas da carga de tráfego	311
A2.3.1	Contagem do tráfego	313
A2.3.2	Procedimentos estáticos ou dinâmicos de pesagem	314
A2.4	Determinação do tráfego do projeto (capacidade estrutural)	315
A2.5	Abordagem prática para estimar o tráfego do projeto	317

A2.1 Terminologia associada ao tráfego

Existem três termos/abreviaturas principais utilizados para descrever o tráfego que passa por uma rodovia, e estes devem ser claramente entendidos para evitar confusões.

- Tráfego médio diário anual (AADT) medido em veículos por dia. Algumas vezes abreviado para tráfego médio diário (ADT). Esta é uma medida do volume total de tráfego diário que utiliza uma estrada. Inclui todo o tráfego em ambos os sentidos e não distingue os diferentes tipos de veículos (carros, caminhões) que compõem o espectro do tráfego, nem o número de pistas. Embora o AADT seja amplamente utilizado para descrever volumes de tráfego, não é uma medida muito útil para fins de projeto estrutural. Uma compreensão do espectro e da separação do tráfego entre as pistas é essencial para determinar a estrutura do pavimento necessária.

- Carga equivalente do eixo-padrão (ESAL). A carga de veículos pesados é sempre regulada pela legislação e os pavimentos rodoviários são projetados de acordo. O termo “carga legal do eixo” define geralmente a carga máxima permitida em um único eixo. Isto varia de um país a outro, tipicamente de 80 kN a 130 kN. Para fins de projeto do pavimento, a configuração do eixo de um veículo é igualmente importante para determinar a carga aplicada em termos de “Carga equivalente do eixo-padrão” (ESALs), com o “eixo padrão” definido (por exemplo, 80 kN).

Os pavimentos são projetados para suportar certo número de ESALs. Isto é denominado de Capacidade Estrutural de um pavimento e é normalmente expresso em milhões (por exemplo, 5 x 106 ESALs).

- Média diária de tráfego equivalente (ADE). Esta é a informação mais útil para o projeto do pavimento, pois define o número de cargas equivalentes do eixo-padrão que estão no momento utilizando a rodovia em cada pista.
  Determinar este número chave é discutido abaixo.

A2.2 Classificação da carga de tráfego

Os pavimentos são classificados pelo número de ESALs que a rodovia foi projetada para suportar durante a sua vida útil (isto é, a capacidade estrutural). Isto apresenta uma estrutura de tempo e exige a definição de "vida do projeto". As autoridades rodoviárias normalmente esperam um retorno do seu investimento em um pavimento e, tipicamente, períodos que variam de 5 a 30 anos são utilizados em tais cálculos. Este período de retorno é então utilizado para definir a vida do projeto do pavimento. Prever o tráfego do projeto (ou o número de ESALs esperado durante esse período) é, portanto, mais importante, pois as implicações dos custos de dados imprecisos são óbvias em termos de números de camadas, espessura e de composição do material.

Tabela A2.1 Classificação típica dos pavimentos

Classe	ESALs x 10^6
T0	< 0,3
T1	0,3 – 1,0
T2	1,0 – 3,0
T3	3,0 – 10,0
T4	10,0 – 30,0
T5	30,0 – 100,0

Existem muitos diferentes sistemas de classificação para descrever a carga de tráfego. Os termos "leve/médio/pesado", usados frequentemente, são demasiado subjetivos e não podem ser utilizados para projetar o pavimento.
Um sistema que classifica o tráfego em faixa de carga é normalmente adotado, conforme ilustrado na Tabela A2.1, que foi adotada como uma diretriz regional em todos os países sul-africanos.

Traduzir contagens de tráfego em informações úteis para o projeto exige a conversão dos dados coletados sobre o espectro do tráfego (discutido abaixo) em ESALs. A Tabela A2.2 pode ser utilizada como um guia geral para determinar o número de ESALs que será aplicado à superfície da rodovia por diferentes tipos de veículos pesados. Deve-se observar que não foi atribuído um fator de ESAL a veículos leves, pois os mesmos não têm qualquer consequência sob uma perspectiva de projeto do pavimento. As ESALs por dados de veículos apresentados na tabela A2.2 derivou de dados de pesquisas coletados na África do Sul, e podem não ser representativos em outros países com diferentes tipos de veículos e espectros de tráfego. Portanto, tais informações devem ser obtidas da autoridade rodoviária pertinente (onde disponível) ou de um exercício de contagem.

Tabela A2.2 – Exemplo de ESALs típicos por veículo pesado

Tipo de veículo	Faixa normal	Média
Caminhão de dois eixos	0,3 – 1,1	0,70
Ônibus de dois eixos	0,4 – 1,5	0,73
Caminhão de três eixos	0,8 – 2,6	1,70
Caminhão de quatro eixos	0,8 – 3,0	1,80
Caminhão de cinco eixos	1,0 – 3,0	2,20
Caminhão de seis eixos	1,6 – 5,2	3,50
Caminhão de sete eixos	3,8 – 5,0	4,40
Média	2,5 – 6,0	

Classes ultrapesadas também são definidas para pavimentos com uma demanda pesada extra, tais como aqueles construídos para pistas de aeroportos importantes e rodovias de transporte de minérios. Contudo, tais pavimentos estão além do escopo deste manual e devem ser considerados como pavimentos para aplicações especiais.

A2.3 Estimativas da carga de tráfego

Os dados disponíveis são utilizados como base para estimar a ADE da carga de tráfego existente. Quando somente os números do AADT estiverem disponíveis, a fórmula fornecida na equação A2.1 abaixo pode ser utilizada para fornecer uma estimativa inicial de ADE.

$$ADE = AADT \times f_H \times f_E \times f_L \times f_G \times f_W$$ [equation A2.1]

where:
f_H = percentual de veículos pesados no espectro do tráfego;
f_E = ESAL média estimada por veículo pesado; e
f_L = fator de distribuição da pista (vide Tabela A2.3)
f_G = fator gradiente (vide Tabela A2.4)
f_W = fator de largura da pista (vide Tabela A2.5)

Determinar o "fator de distribuição das pistas" exige uma análise cuidadosa, especialmente em autoestradas divididas em múltiplas pistas, onde a pista lenta invariavelmente suporta um número mais elevado de veículos pesados do que as pistas do meio ou rápida.

	Tabela A2.3 Fator de distribuição da pista (exemplo) f_L		
Total de pistas (Ambas as direções)	Pista lenta	Pista do meio	Pista rápida
2	0,5		
4	0,48		0,15
6	0,35	0,3	0,13

A Tabela A2.3 fornece diretrizes com base nos padrões do tráfego. Estes fatores provavelmente variam de país para país, pois refletem tipicamente os hábitos dos motoristas, práticas de aplicação da lei, etc. Os dados divididos em pistas da Tabela A2.3 refletem os padrões de tráfego normais para autoestradas intermunicipais. Rodovias que são, predominantemente, rotas de transporte unidirecional (por exemplo, propriedade rural–mercado e minas – ferrovias) obviamente não se encaixam neste padrão.

O "fator gradiente" reconhece o aumento nas cargas dos pneus, devido à redução na velocidade de veículos pesados que se arrastam em aclives íngremes, enquanto o "fator de largura da pista" reconhece o efeito de concentração da carga do trânsito confinado. As Tabelas A2.4 e A2.5 incluem os fatores recomendados pelas autoridades alemãs de autoestradas na sua publicação "RStO 01"

Tabela A2.4 Fator gradiente

Gradiente (%)	f_G
Menos de 2	1,0
2,0 a 4	1,02
4 a 5	1,05
5 a 6	1,09
6 a 7	1,14
7 a 8	1,20
8 a 9	1,27
9 a 10	1,35
Mais de 10	1,45

Tabela A2.5 Fator de largura da pista

Largura da pista	F_W
Menos de 2,5 m	2,0
2,5 m a 2,75 m	1,8
2,75 m a 3,25 m	1,4
3,25 m a 3,75 m	1,1
Mais de 3,75 m	1,0

(Os códigos de projeto em alguns países excluem o Fator de Largura da Pista pois presumem um fluxo canalizado. F_w é, portanto, uma constante 1.0)

Estimativas baseadas em AADT, percentual médio de veículos pesados e número médio de ESALs por veículo pesado (F_E) devem ser tratados com cuidado. Estas são somente estimativas e não devem ser utilizadas como uma informação principal para o projeto de pavimentos importantes. Quando houver alguma dúvida sobre a exatidão ou relevância dos dados do tráfego disponíveis, uma pesquisa detalhada do tráfego deve ser realizada para determinar a ADE por pista. Vários métodos de pesquisa podem ser empregados, incluindo:

A2.3.1 Contagem do tráfego

É normalmente realizada em pontos específicos (tais como intersecções, etc.) ao longo de um período de 12, 18 ou 24 horas. A contagem real pode então ser convertida para períodos de 24 horas aplicando fatores apropriados para obter o AADT, quando necessário. O número de veículos pesados é normalmente expresso como um percentual do AADT.

As contagens do tráfego devem incluir o número total de veículos que trafegam por dia em cada pista (em cada direção), separado em tipos de veículos. A categoria da rodovia (por exemplo, autoestrada principal ou rodovia de acesso a propriedades rurais) e a tecnologia disponível normalmente ditarão se a contagem deve ser conduzida eletronicamente. Métodos sofisticados estão atualmente disponíveis para contar o número de eixos (e mesmo para realizar pesagens em movimento. Vide abaixo), mas estes métodos são caros e, consequentemente utilizados somente em autoestradas importantes. As contagens físicas ainda são as mais populares e, dependendo do nível de competência das pessoas empregadas, observações visuais confiáveis podem ser obtidas simultaneamente para confirmar certos pressupostos e garantir uma previsão mais exata da carga do tráfego. Os seguintes detalhes devem ser avaliados a partir das observações:

- frete sobre os veículos (vazio, com meia carga ou carga inteira) e a natureza das cargas;
- tipo de veículo e número de eixos por veículo pesado;
- uso da pista e tendências atuais do desenvolvimento; e
- possível "atração do tráfego" quando a rodovia for concluída.

Estas observações auxiliam a atribuir ESALs por veículo para os vários tipos de veículos (mostrados na Tabela A2.2), bem como a melhorar a precisão das previsões de crescimento do tráfego.

Quando as pesquisas forem concluídas, a ADE é determinada para cada pista utilizando a fórmula:

$$ADE = \Sigma(n_J \times (F_E)_J) \quad \text{[Equação A2.2]}$$

onde:
n_J = número de veículos para cada tipo de veículo (J) no espectro do tráfego;
$(F_E)_J$ = ESAL média estimada por veículo para cada tipo de veículo (J). (Vide Tabela A2.2)

O grau e extensão da sobrecarga é uma estatística importante, pois a filosofia do projeto do pavimento se baseia na carga padrão do eixo. Sobrecargas causam danos severos ao pavimento. Todas as informações sobre sobrecarga devem, portanto, ser obtidas, normalmente da autoridades legais. Na ausência de informações confiáveis, é aconselhável fazer uma avaliação conduzindo uma pesquisa da carga. Uma amostra representativa dos veículos pesados deve ser pesada para determinar o número (ou percentual) de veículos sobrecarregados, e o grau de sobrecarga. Os resultados podem então ser extrapolados para toda a população de veículos pesados.

A2.3.2 Procedimentos estáticos ou dinâmicos de pesagem

Estas são medidas típicas tomadas em campo para determinar a gama de cargas reais de eixos:

- A pesagem estática é a pesagem estacionária de veículos e, portanto, limitada a uma amostra de veículos em uma rodovia específica. Deve-se tomar cuidado para que a amostra escolhida represente o espectro completo do tráfego e não somente aqueles que veículos carregados. A pesagem realizada para fins de aplicação da lei não deve, portanto, ser utilizadas.
- A pesagem dinâmica é um procedimento de mensuração continua tipicamente ao longo de um período de sete dias em um local específico. Este método é o mais preciso e apropriado para estimar o tráfego e fornece o número de eixos em cada uma das categorias predefinidas de massa de eixos. Contudo, devido aos altos custos relacionados, este método raramente é justificável em rodovias de menor importância.

Quando as pesquisas forem concluídas, a ADE é determinada para cada pista utilizando a fórmula:

$$ADE = \Sigma(n_M \times D_M)$$ [Equação A2.3]

onde:
n_M = número de eixos para cada categoria predefinida de massa do eixo (M);
D_M = ESALs médias calculadas por categoria de massa do eixo (M).

As ESALs médias por categoria de massa do eixo são calculadas a partir de:

$$D_M = (P_M / SAL)^d$$ [Equação A2.4]

onde:
P_M = carga do eixo em kN para cada categoria de massa do eixo
SAL = Carga padrão do Eixo pertinente em kN (por exemplo, 80 kN)
d = coeficiente de dano. Dependendo do tipo de pavimento e material nas várias camadas. Um valor de n = 4 é geralmente utilizado como uma média. Pavimentos rasos (relativamente finos, mas com camadas superiores fortes) possuem valores n superiores a 4, enquanto pavimentos menos sensíveis (profundos) possuem valores n inferiores a 4.

A2.4 Determinação do tráfego do projeto (capacidade estrutural)

Quando a ADE corrente por pista tiver sido determinada, o aumento da ADE devido ao crescimento esperado do tráfego durante o período do projeto é calculado conforme segue:

$$ESALs_{total} = ADE \times f_J$$ [Equação A2.5]

onde:
$ESALs_{total}$ = capacidade estrutural para o período do projeto

$$f_J = \text{fator de crescimento cumulativo} = \frac{365 \times (1 + 0.01i) \times [(1 + 0.01i)^y - 1]}{(0.01i)}$$ [Equação A2.6]

onde:
i = taxa prevista de crescimento do tráfego em percentual
y = número de anos na vida do projeto.

O fator de crescimento cumulativo (fJ) também pode ser obtido nas tabelas padrão, como a mostrada abaixo sob o nome de Tabela A2.6.

Tabela A2.6 Fator de Crescimento Cumulativo f_J					
Vida do projeto y (anos)	f_J para crescimento do tráfego de i por ano				
	i = 2%	i = 4%	i = 6%	i = 8%	i = 10%
5	1.937	2.056	2.181	2.313	2.451
8	3.195	3.498	3.829	4.193	4.592
10	4.077	4.558	5.100	5.711	6.399
12	4.993	5.704	6.527	7.481	8.586
15	6.438	7.601	9.005	10.703	12.757
20	9.046	11.304	14.232	18.039	22.996
25	11.925	15.809	21.227	28.818	39.486
30	15.103	21.290	30.588	44.656	66.044

Observação:
Os dados mostrados na Tabela A2.6 não incluem todos os valores para as variáveis i e y. Deve-se tomar cuidado ao estimar os valores intermediários, pois a interpoção ou extrapolação diretas podem produzir um resultado impreciso. A equação A2.6 deve, depois disso, ser utilizada para calcular f_J.

Ao estimar a taxa prevista de crescimento do tráfego, influências diversas do crescimento econômico devem ser identificadas. O melhoramento de rodovias e a recuperação de pavimentos frequentemente atraem um tráfego que normalmente utilizaria rotas alternativas.

A2.5 Abordagem prática para estimar o tráfego do projeto

Os procedimentos descritos acima sempre devem ser seguidos quando se determina a capacidade estrutural (tráfego do projeto) em nível de projeto. Contudo, frequentemente há uma necessidade de uma estimativa aproximada dos requisitos da capacidade estrutural para uma rodovia específica, de obter um número "ball-park" (estimado) para guiar o planejamento em um nível de rede, bem como de avaliar as inadequações dos pavimentos existentes. Além disso, tais estimativas normalmente são feitas no início de um projeto para "sentir" o tipo do pavimento exigido em relação ao nível de tráfego que necessita ser acomodado.

Quando o número de veículos pesados for conhecido, uma estimativa "por alto" dos requisites da capacidade estrutural pode ser feita utilizando a Tabela A2.7. Esta tabela associa o "Número de veículos pesados por pista e por dia" ao "Tráfego do projeto" (capacidade estrutural) em termos de ESALs x 106, com três variáveis; o crescimento composto do tráfego, a vida do projeto do pavimento (anos) e o fator de carga (número médio de ESALs por veículo pesado).

Por exemplo: Quando o número de veículos pesados se deslocando em uma direção de uma rodovia de duas pistas for 100 por dia, as ESALs médias por veículo pesado PE 2 e o crescimento composto do tráfego é de 4% por ano, a capacidade estrutural exigida para uma vida de projeto de 10 anos, da Tabela A2.7 é 0,91 x 10^6 ESALs. Se o número médio de ESALs por veículo pesado aumentar para 3,5, a exigência de capacidade estrutural aumenta para 1,6 x 10^6 ESALs.

Observação:
Usuários desta tabela devem reconhecer qualquer estimativa da capacidade estrutural assim derivada possui severas limitações e somente pode ser utilizada como um indicador. A maior deficiência é a falta de definição de um "veículo pesado", presumindo-se que todos tenham o mesmo número de 80 kN ESALs. Portanto, os projetos de pavimentos não devem se basear em tais informações; uma análise correta e previsão do tráfego seguindo os procedimentos descritos nesta seção sempre devem ser adotados.

Tabela A2.7. Guia para estimar o Tráfego do Projeto (Capacidade Estrutural) em milhões de cargas equivalentes do eixo padrão de 80 kN (ESALs x 10^6)

No. de veículos pesados por dia	Crescimento composto do tráfego	Vida do projeto do pavimento (anos)							
		5				10			
		Fator de carga do veículo (80 kN ESALs por veículo pesado)							
		0,6	2	3,5	4,4	0,6	2	3,5	
10	2% 4% 6% 8%								
20	2% 4% 6% 8%							0,29 0,32 0,36 0,40	
50	2% 4% 6% 8%			0,34 0,36 0,38 0,40	0,43 0,45 0,48 0,51		0,41 0,46 0,51 0,57	0,71 0,80 0,89 1,00	
100	2% 4% 6% 8%		0,39 0,41 0,44 0,46	0,68 0,72 0,76 0,81	0,85 0,90 0,96 1,02	0,27 0,31 0,34	0,82 0,91 1,02 1,14	1,43 1,60 1,78 2,00	
500	2% 4% 6% 8%	0,58 0,62 0,65 0,69	1,94 2,06 2,18 2,31	3,39 3,60 3,82 4,05	4,26 4,52 4,80 5,09	1,22 1,37 1,53 1,71	4,08 4,56 5,10 5,71	7,13 7,98 8,92 9,99	
1,000	2% 4% 6% 8%	1,16 1,23 1,31 1,39	3,87 4,11 4,36 4,63	6,78 7,20 7,63 8,09	8,52 9,05 9,60 10,18	2,45 2,73 3,06 3,43	8,15 9,12 10,20 11,42	14,27 15,95 17,85 19,99	
3,000	2% 4% 6% 8%	3,49 3,70 3,93 4,16	11,62 12,34 13,09 13,88	20,34 21,59 22,90 24,28	25,57 27,14 28,79 30,53	7,34 8,20 9,18 10,28	24,46 27,35 30,60 34,26	42,80 47,85 53,55 59,96	
5,000	2% 4% 6% 8%	5,81 6,17 6,54 6,94	19,37 20,56 21,81 23,13	33,91 35,98 38,17 40,47	42,62 45,23 47,98 50,88	12,23 13,67 15,30 17,13	40,77 45,58 51,00 57,11	71,34 79,76 89,24 99,94	

Chave: < 0,256 x 10^6 ESALs

Tabela A2.7. Guia para estimar o Tráfego do Projeto (Capacidade Estrutural) em milhões de cargas equivalentes do eixo padrão de 80 kN (ESALs x 10^6)

	15				20			
4,4	0,6	2	3,5	4,4	0,6	2	3,5	4,4
			0,27 0,32 0,37	0,28 0,33 0,40 0,47		0,28 0,36 0,36	0,32 0,40 0,50 0,63	0,40 0,50 0,63 0,79
0,36 0,40 0,45 0,50		0,26 0,30 0,36 0,43	0,45 0,53 0,63 0,75	0,57 0,67 0,79 0,94		0,45 0,57 0,72 0,90	0,63 0,79 1,00 1,26	0,80 0,99 1,25 1,59
0,90 1,00 1,12 1,26	0,27 0,32	0,64 0,76 0,90 1,07	1,13 1,33 1,58 1,87	1,42 1,67 1,98 2,35	0,27 0,34 0,43 0,54	1,13 1,42 1,80 1,81	1,58 1,98 2,49 3,16	1,99 2,49 3,13 3,97
1,79 2,01 2,24 2,51	0,39 0,46 0,54 0,64	1,29 1,52 1,80 2,14	2,25 2,66 3,15 3,75	2,83 3,34 3,96 4,71	0,54 0,68 0,85 1,08	2,26 2,85 3,61 9,05	3,17 3,96 4,98 6,31	3,98 4,97 6,26 7,94
8,97 10,03 11,22 12,56	1,93 2,28 2,70 3,21	6,44 7,60 9,01 10,70	11,27 13,30 15,76 18,73	14,16 16,72 19,81 23,55	2,71 3,39 4,27 5,41	11,30 14,23 18,04 18,09	15,83 19,78 24,91 31,57	19,90 24,87 31,31 39,69
17,94 20,05 22,44 25,13	3,86 4,56 5,40 6,42	12,88 15,20 18,01 21,41	22,53 26,60 31,52 37,46	28,33 33,44 39,6+2 47,09	5,43 6,78 8,54 10,82	22,61 28,46 36,08 54,28	31,66 39,56 49,81 63,14	39,80 49,74 62,62 79,37
53,81 60,16 67,32 75,38	11,59 13,68 16,21 19,27	38,63 45,61 54,03 64,22	67,60 79,81 94,56 112,39	84,99 100,33 118,87 141,28	16,28 20,35 25,62 32,47	67,82 85,39 108,24 90,46	94,98 118,69 149,44 189,41	119,41 149,21
89,68 100,27 112,19 125,63	19,32 22,80 27,02 32,11	64,38 76,01 90,05 107,03	112,67 133,02	141,64	27,14 33,91 42,70 54,12	113,04 142,32		

> 250 x 10^6 ESALs

Appendix 3 – Diretrizes para compilar as especificações de projetos de reciclagem

A3.1	**Escopo**	**323**
A3.2	**Materiais**	**325**
A3.2.1	Material de pavimentação in situ	325
A3.2.2	Material natural ou processado importado	325
A3.2.3	Agentes estabilizantes	326
A3.2.4	Água para construção	327
A3.3	**Usina e equipamentos**	**328**
A3.3.1	Recicladoras	329
A3.3.2	Equipamento para compactação e acabamento	331
A3.3.3	Caminhões tanque para o abastecimento de agentes estabilizantes betuminosos	332
A3.4	**Construção**	**333**
A3.4.1	Limitações e requisitos gerais	333
A3.4.2	Exigências anteriores ao início da reciclagem	334
A3.4.3	Adição de agentes estabilizantes	336
A3.4.4	Reciclagem	339
A3.4.5	Instabilidade do subleito	340
A3.4.6	Compactação e acabamento	341
A3.5	**Seções de ensaios**	**342**
A3.6	**Proteção e manutenção**	**343**
A3.7	**Tolerâncias da construção**	**344**

A3.7.1	Níveis da superfície	344
A3.7.2	Espessura da camada	344
A3.7.3	Larguras	345
A3.7.4	Corte transversal	345
A3.7.5	Regularidade da superfície	345
A3.8	**Inspeção e testes de rotina**	**346**
A3.8.1	Taxa de aplicação dos agentes estabilizantes	347
A3.8.2	Resistência do material estabilizado	348
A3.8.3	Densidade alcançada	349
A3.9	**Medição e pagamento**	**350**
A3.9.1	Itens de medição	350
A3.9.2	Exemplo de uma programação típica das quantidades	353

A recuperação de pavimentos pela reciclagem é uma tecnologia relativamente nova. Consequentemente, algumas especificações padrão foram compiladas, que abrangem adequadamente os requisitos da construção. Estas diretrizes foram incluídas para auxiliar na compilação da documentação do contrato pertinente. Elas seguem o formato normal e títulos de uma especificação padrão, fornecendo orientações e exemplos das características importantes que devem ser incluídas para evitar conflitos, e procedimentos de reivindicações normalmente encontrados quando as especificações são ambíguas.

A3.1 Escopo

As especificações para a parcela de reciclagem das obras devem cobrir todas as operações em conexão com a construção de uma nova camada de pavimento utilizando predominantemente material reciclado das camadas superiores de uma rodovia existente. Estas operações incluem:

- quebrar e recuperar o material nas camadas superiores dos pavimentos de rodovia existente;
- modificar a natureza do material recuperado pela adição de material importado;
- o fornecimento e aplicação de agentes estabilizantes e água; e
- misturar, colocar, compactar e modelar para obter uma nova camada do pavimento.

A composição do pavimento raramente é uniforme ao longo de grandes seções da rodovia. Além das variações na espessura de camadas individuais, a qualidade do material utilizado na construção original muitas vezes varia. Medidas de manutenção, melhoria e recuperação aplicadas durante a vida de serviço da rodovia também causam uma variabilidade adicional na porção superior do pavimento. Onde houver mais de um tipo de operação de reciclagem a ser realizado, cada uma deve ser descrita por completo. Por exemplo, se o comprimento do projeto a ser recuperado pela reciclagem for de 32,9 km e houver sete tipos diferentes de pavimento com tratamentos diferentes, esses devem ser detalhados conforme indicado na tabela exemplificativa a seguir.

Tabela mostrando as diferentes operações de reciclagem necessárias (exemplo)

No.	Início	Fim	Com-primento (m)	Profundidade da reciclagem (mm)	Tratamento exigido para a recuperação
1	29+900	32+900	3.000	175	Tratar previamente com cal a 2%. Em 24 horas, estabilize com 3% de espuma de asfalto
2	32+900	35+000	2.100	200	Reciclar com 1% de cimento e 2,7% de espuma de asfalto
3	35+000	38+600	3.600	150	Acrescentar uma camada de 75 mm de pó britado antes de reciclar com espuma de asfalto
4	38+600	49+400	10.800	300	Reciclar com 3% de cimento como uma nova sub-base. Importe RAP peneirado de 125 mm e recicle 150 mm com 2% de espuma de asfalto
5	49+400	54+800	5.400	225	Tratar previamente com cal a 2%. Em 24 horas, estabilize com 3% de espuma de asfalto
6	54+800	61+000	6.200	150	Acrescentar uma camada de 75 mm de pó britado antes de reciclar com espuma de asfalto
7	61+000	62+800	1.800	300	Reciclar com 3% de cimento como uma nova sub-base. Importe RAP peneirado de 125 mm e recicle 150 mm com 2% de espuma de asfalto

A descrição geral do pavimento a ser reciclado de acordo com o contrato, a profundidade e tipo de reciclagem (por exemplo: 175 mm de profundidade tratado com 1% de cimento Portland comum e 2,5% de emulsão betuminosa), bem como o produto final exigido, devem ser claramente definidos.

Além disso, os requisitos do projeto de cada tipo de material reciclado, tratado com agentes estabilizantes, devem ser especificados. Isso normalmente é incluído como uma tabela mostrando os requisitos mínimos em termos de parâmetros de resistência e densidade da camada compactada. A tabela a seguir mostra um exemplo de um projeto de reciclagem típico que inclui a estabilização de cimento e de espuma de asfalto:

Seção	Origem do material / profundidade da reciclagem (mm)	Taxa de aplicação do agente estabilizante (% por massa)		Requisitos mínimos de resistência		Densidade Minima
		Cimento	Espuma de asfalto	ITS_{DRY} (kPa)	UCS (MPa)	% de mod AASHTO T-180
km1+200 to 2+800	In-situ/250	2.5		200	1,5	98
km1+200 to 2+800	Imported/125	1	2,0	225	n/a	102
km2+800 to 8+600	In-situ/200	1	2,5	175	n/a	100
km8+600 to 12+800	In-situ/300	3,0		200	1,5	98
km8+600 to 12+800	Importado/150	1	2,0	225	n/a	102

Os resultados dos projetos da mistura juntamente com as suposições feitas na determinação do projeto do pavimento são utilizados como diretrizes na compilação de tal tabela. Os métodos pertinentes a serem utilizados para determinar a resistência (métodos de teste) também devem ser especificados.

Uma palavra de advertência sobre a compilação de tais especificações: Os valores especificados devem ser possíveis de serem alcançados em campo e, consequentemente, é importante contatar as pessoas responsáveis pelas investigações em campo e pelos procedimentos do projeto. Por exemplo, especificar uma exigência de densidade de 104% da densidade AASHTO modificada para uma camada reciclada sobreposta sobre material não estabilizado é pouco prática. Do mesmo modo, especificar uma exigência de resistência similar ao máximo obtido dos projetos de mistura em laboratórios não é realista.

Além disso, a seguinte frase é normalmente incluída para atribuir a responsabilidade àqueles que estão no comando, especialmente o empreiteiro que está no controle da obra:

O empreiteiro deverá ser responsável por organizar e executar as suas operações de forma a que estas exigências sejam atendidas.

A3.2 Materiais

A3.2.1 Material de pavimentação in situ

Os detalhes de todas as pesquisas do pavimento realizadas por aquele responsáveis por projetar e especificar os requisitos de recuperação devem ser mostrados, normalmente em um apêndice. Estas pesquisas incluem:

- descrição detalhada das estruturas de pavimentação existentes que devem ser recicladas;
- os resultados dos testes realizados, indicando a granulometria, plasticidade e outras propriedades do material a ser reciclado das camadas superiores do pavimento; e
- teores de umidade in-situ relevantes dos vários materiais no pavimento existente, medidos no momento em que as pesquisas foram realizadas.

A seguinte isenção de responsabilidade é normalmente incluída:

Estas informações são oferecidas de boa fé mas, com relação a circunstâncias relacionadas aos procedimentos de amostragem e de teste e ao tipo de informações fornecidas, nenhuma garantia pode ser dada de que todas as informações são corretas ou representam as condições in situ no momento da construção. Toda a confiança por parte do empreiteiro em tais informações deverá ser por seu próprio risco, e o mesmo deverá realizar o seu próprio programa de testes para determinar as condições que prevalecem no momento da construção.

A3.2.2 Material importado ou material processado

Quando os requisites do projeto exigem que material importado seja misturado com aquele reciclado do pavimento existente, a razão para tal importação necessita ser informada, juntamente com especificações claras do tipo e quantidade do material a ser importado. O material é normalmente importado por uma ou mais das seguintes razões:

- para modificar a classificação granulométrica do material reciclado;
- para realizar uma modificação mecânica;
- para suplementar o material reciclado com a finalidade de corrigir a forma; e / ou
- para aumentar a espessura total do pavimento.

Os empreiteiros devem entender a lógica por trás de tais exigências para formularem a sua oferta mais econômica, pois isso envolve uma séria de alternativas (por exemplo, comprar material de uma fonte comercial ou estabelecer a suas próprias instalações para britagem).

Além disso, devem ser fornecidas todas as condições especiais sob as quais o material a ser importado (por exemplo, importar antes ou após o pavimento existente ser previamente pulverizado). O tipo de material (por exemplo, brita graduada com CBR >100% dentro de uma classificação especificada) e a quantidade a ser importada deve ser clara (por exemplo, 30% por volume de nova camada. Alternativamente, espalhe como uma camada de 75 mm nominais (após a compactação) sobre a superfície da rodovia existente).

A3.2.3 Agentes estabilizantes

O tipo e a qualidade de todos os agentes estabilizantes que serão utilizados no projeto devem ser claramente especificados juntamente com todas as normas pertinentes que regem a sua manufatura (por exemplo, cimento Portland comum em conformidade com as exigências de BS 12.) e uso. Além disso, todas as exigências especiais (por exemplo, manuseio e armazenagem) devem ser indicadas. Por exemplo, o seguinte parágrafo normalmente é incluído quando o cimento é especificado como um agente estabilizante:

Do momento da compra até o momento de usar, todo o cimento deve ser mantido sob uma cobertura e protegido da umidade, tudo de acordo com as recomendações do fabricante ou do fornecedor. Todas as remessas desses materiais serão utilizadas na sequência igual à da sua entrega no local. Os estoques armazenados por mais de três meses não devem ser utilizados nas obras sem autorização.

Quando a estabilização de espuma de asfalto for especificada, o tipo de betume a ser utilizado deve ser especificado (por exemplo, grau de penetração 80/100) e as seguintes exigências normalmente são incluídas nesta seção das especificações:

O betume para a estabilização de espuma de asfalto deverá ser aquecido, armazenado e aplicado estritamente de acordo com as exigências detalhadas abaixo. (Liste as exigências específicas, por exemplo, temperatura máxima de 195º C). Todo o betume para a estabilização deverá ser entregue no local em caminhões tanque. Cada caminhão tanque deverá ter um “Certificado de Carregamento” emitido, contendo as seguintes informações:

- detalhes da identificação da unidade de transporte;
- identificação do produto (por exemplo, betume com grau de penetração de 1500/200);
- nome do fornecedor de betume;
- o número pertinente do lote e a data de manufatura;
- certificado da plataforma de pesagem indicando a massa líquida do produto;
- a temperatura em que o produto foi carregado no caminhão tanque;
- a data, hora e local do carregamento;
- comentários relacionados a quaisquer anormalidades do estado do caminhão tanque no momento da carga (por exemplo, limpeza interna, detalhes da carga anterior e se havia algum produto residual da carga anterior; e
- os detalhes de todos os produtos químicos ou outras substâncias adicionadas ao produto, antes, durante ou após do procedimento do carregamento (por exemplo, agente antidescascamento).

A3.2.4 Água para construção

Todas as limitações sobre a qualidade da água a ser utilizada na construção devem ser especificadas. O seguinte parágrafo normalmente é incluído:

A água deve ser pura e livre de concentrações prejudiciais de ácidos, base alcalina, sais, açúcar e outras substâncias orgânicas ou químicas. Se a água utilizada não for obtida de uma fonte pública de água potável, testes podem ser necessários para comprovar a sua adequação.

A3.3 Usina e equipamentos

Para proteger de uma mão de obra ruim resultante do uso de maquinário impróprio, os seguintes parágrafos são típicos daqueles normalmente incluídos nas especificações de reciclagem:

Todas as usinas e equipamentos devem ser fornecidos e operados de maneira a reciclar pavimentos in situ com a profundidade especificada e construir uma camada nova, tudo de acordo com as exigências das especificações. Todas as usinas e equipamentos desenvolvidos no local devem ter uma capacidade nominal adequada e estar em boas condições de operação. Uma usina obsoleta, mal mantida ou dilapidada não será permitida no local.

As exigências mínimas de conformidade para a usina e equipamentos a serem utilizados na obra de reciclagem são fornecidas nas seguintes subcláusulas. O empreiteiro deverá fornecer ao Engenheiro todos os detalhes e especificações técnicas da usina e equipamentos a serem utilizados na obra de reciclagem, no mínimo, duas semanas antes do primeiro uso proposto.

A3.3.1 Recicladoras

Os seguintes normalmente são incluídos para garantir a adequação da recicladora utilizada no local:

A reciclagem deverá ser realizada utilizando uma recicladora construída para a finalidade para recuperar o material nas camadas superiores do pavimento existente e misturar-se a todo o material importado pré-espalhado como uma camada uniforme sobre a superfície existente da rodovia. A máquina empregada deverá ser capaz de alcançar a classificação e a consistência exigidas da mistura em uma única passagem. Como um mínimo, a recicladora deverá ter as seguintes características:

- Deverá ser construída em fábrica por um fabricante proprietário que tenha uma reputação e um histórico de manufatura no tipo específico do equipamento;
- Se tiver mais de 10 anos, a máquina deverá ser certificada pelo fabricante ou pelo representante autorizado do fabricante para confirmar a adequação à finalidade operacional, datada de não mais de 3 meses da data de início da obra do projeto;
- O tambor de fresagem deverá ter uma largura mínima de corte de 2 metros com capacidade para modificar a velocidade da rotação. A máquina deverá ser capaz de reciclar até uma profundidade máxima (especificada nestes documentos) em uma única passagem;
- Um sistema de controle do nível, que mantenha a profundidade de fresagem dentro de uma tolerância de ± 10 mm da profundidade exigida durante a operação contínua;
- O tambor de fresagem deverá girar dentro de uma câmara fechada, dentro da qual água e agentes estabilizantes são adicionados ao material recuperado, na taxa exigida para cumprir com os requisitos especificados durante uma operação contínua.
- Todos os sistemas de espargimento adaptados à recicladora devem ser controlados por microprocessador para regular a taxa de fluxo com a velocidade de avanço da máquina. Todos os sistemas de espargimento também deverão ter a capacidade de permitir larguras variáveis de aplicação; e
- A recicladora deverá ter potência suficiente para misturar o material reciclado, juntamente com todos os aditivos para produzir um material homogeneamente misturado durante a operação contínua.

Especificações adicionais são incluídas para abordar o tipo de agente estabilizante aplicado. Os seguintes são exemplos de estabilização com cimento, emulsão betuminosa e espuma de asfalto.

Exigências adicionais quando da estabilização com cimento.
Onde o agente estabilizante de cimento não for aplicado diretamente sobre a superfície da rodovia antes da reciclagem, a recicladora deve ser alimentada com pasta de cimento produzida em uma unidade separada de mistura móvel empurrada à frente da recicladora. Tal unidade de mistura deverá ter as seguintes características mínimas:

- capacidade de fornecer a pasta de cimento na taxa necessária para cumprir com a taxa de aplicação especificada do cimento durante a operação contínua;
- ser capaz de regular a taxa de aplicação de pasta de cimento, de acordo com a velocidade do avanço da recicladora e do volume de material durante a operação contínua;
- fornecer uma aplicação uniforme de pasta de cimento ao material reciclado para produzir uma mistura homogênea; e
- um método controlado por microprocessador para monitorar o uso do cimento durante a operação, que poderá ser validada pela simples medição física para fins de controle.

Exigências adicionais quando da estabilização com emulsão betuminosa.
Além disso, a recicladora deverá ter as seguintes capacidades:

- Fornecer a emulsão betuminosa na taxa de aplicação especificada durante a operação contínua;
- Regular a taxa de aplicação da emulsão betuminosa, de acordo com a velocidade do avanço da recicladora e do volume de material sendo reciclado;
- Fornecer uma aplicação uniforme da emulsão betuminosa ao material reciclado para produzir uma mistura homogênea; e
- Um método para monitorar a aplicação da emulsão betuminosa durante a operação, que possa ser reconciliada pela simples medição física para fins de controle.

Exigências adicionais quando da estabilização com espuma de asfalto.
Além disso, a recicladora deverá ter as seguintes características

- uma série de câmaras de expansão montadas equidistantes na barra de espargimento (espaçamento máximo de 200 mm) para criar a espuma de asfalto;
- capacidade para fornecer uma fonte constante do espuma de asfalto na taxa de aplicação especificada durante a operação contínua;
- capaz de regular a qualidade da espuma de asfalto e de regular a taxa da aplicação de acordo com a velocidade de avanço da recicladora e com o volume de material sendo reciclado;
- fornecer uma aplicação uniforme da espuma de asfalto em toda a largura de aplicação para produzir uma mistura homogênea;
- um método para monitorar a aplicação do betume durante a operação, que possa ser reconciliado pela simples medição física para fins de controle;
- temperatura de operação e manômetros na linha de alimentação de betume para fins de monitoramento;

- meios de demonstrar que todas as câmaras de expansão estão produzindo espuma de asfalto a qualquer momento durante a operação (nenhum bloqueio); e
- meios de fornecer uma amostra representativa de espuma de asfalto em qualquer estágio durante operações normais (bocal de teste).

A seguinte frase é normalmente adicionada ao final desta seção:

O material misturado deverá sair da câmara de mistura de maneira a evitar a segregação das partículas e ser colocado de volta continuamente na escavação criada pela recicladora enquanto essa avança. Espalhar e colocar para dar forma à nova camada serão realizados por uma motoniveladora somente após a compactação preliminar ser obtida (a menos que colocada por uma mesa montada na parte traseira da máquina de reciclagem).

A3.3.2 Equipamento de compactação e acabamento

Para evitar a aplicação incorreta do equipamento de compactação e proteger do fenômeno de “bridging” (espaçamento), é aconselhável incluir os seguintes:

A compactação inicial do material reciclado deve ser realizada utilizando um rolo vibratório utilizando um único tambor somente em modo de vibração de alta amplitude. A massa estática do rolo a ser utilizado deve ser determinada pela espessura da camada reciclada, de acordo com a seguinte tabela:

Espessura da camada compactada	Massa estática mínima do rolo (tons)	Tipo de tambor
< 150 mm	12	Regular
150 mm to 200 mm	15	Regular ou com patas
200 mm to 250 mm	18	pedal
> 250 mm	20	pedal

A velocidade de operação do rolo principal nunca deverá ultrapassar 3 km/h, e o número de passadas aplicadas ao longo de toda a largura de cada corte deve ser suficiente para alcançar, no mínimo, a densidade especificada para a camada nos dois terços inferiores da camada. Quando um compactômetro for especificado para controlar a densidade, o mesmo deve ser equipado com um rolo preliminar.

A3.3.3 Caminhões tanque para o abastecimento de agentes estabilizantes betuminosos

A seguinte cláusula deve ser incluída quando da estabilização com emulsão betuminosa ou espuma de asfalto:

Somente caminhões tanque com uma capacidade que superior a dez mil (10.000) litros devem ser empregados para alimentar a recicladora com os agentes estabilizantes de betume. Cada caminhão tanque deve estar equipado com dois engates para reboque, um na parte dianteira e outro na parte traseira, permitindo desse modo que o caminhão tanque seja empurrado a partir da traseira da recicladora, e empurre um caminhão de água na parte dianteira. Nenhum caminhão com vazamento será permitido no local. Além disso, cada caminhão tanque deverá estar equipado com:

- Um termômetro em funcionamento para mostrar a temperatura dos conteúdos no terço inferior do tanque; e
- Uma válvula de alimentação traseira, com um diâmetro interno mínimo de 75 milímetros quando totalmente aberta, que seja capaz de drenar os conteúdos do tanque.

Onde a espuma de asfalto for aplicada, os seguintes marcadores adicionais serão incluídos:

- revestimento de proteção em toda a volta para reter o calor; e
- um sistema de aquecimento capaz de elevar a temperatura dos conteúdos do tanque em, no mínimo, 20° C por hora.

A3.4 Construção

Frases típicas normalmente incluídas nesta seção são reproduzidas abaixo.

A3.4.1 Limitações e requisitos gerais

Limitações climáticas

Nenhum trabalho deverá ser realizado durante condições de névoa ou umidade, nem a obra deve iniciar se houver riscos de não ser concluída antes de tais condições se estabelecerem. Similarmente, a obra não deverá ser realizada se a temperatura ambiente do ar estiver abaixo de 5º C. Nenhum trabalho adicional, com exceção do acabamento e compactação, será permitido se a temperatura do ar cair abaixo de 10º C durante as operações.

Espalhar agentes estabilizantes com produtos químicos pulverizados (cal e cimento) na rodovia à frete da recicladora não será permitido quando as condições dos ventos afetarem adversamente a operação.

Acomodação do tráfego

O empreiteiro deve ser responsável pela passagem confortável do tráfego público ao longo de seções da rodovia onde ele está trabalhando e deve, durante todo o tempo, adotar os cuidados necessários para proteger o público e facilitar o fluxo do tráfego.

Limitações de tempo

O tempo máximo entre a mistura do material reciclado com um agente estabilizante e a compactação do material colocado deve ser determinado pelo tipo de agente estabilizante empregado:

– cimento:	três (3) horas;
– cal hidratada:	oito (8) horas se mantida úmida;
- emulsão betuminosa:	24 horas (ou antes de a emulsão quebrar);
- espuma de asfalto:	24 horas; e
– produtos proprietários:	conforme as instruções do fabricante.

A3.4.2 Exigências anteriores ao início da reciclagem

Plano de produção

Antes de iniciar o trabalho todos os dias, o empreiteiro deverá preparar um plano de produção detalhando as suas propostas de trabalho para o dia seguinte. Este plano deverá incluir, no mínimo:

– uma esboço mostrando o layout geral do comprimento e largura da rodovia a ser reciclada durante o dia, separado pelo número de cortes paralelos exigidos para obter a largura especificada e as dimensões da sobreposição em cada junção longitudinal entre os cortes;
– a sequência e o comprimento de cada corte a ser reciclado antes de iniciar o corte adjacente ou seguinte;
– uma estimativa do tempo necessário para a fresagem, compactação e acabamento de cada corte. O tempo necessário para reciclar cada corte deve ser indicado no esboço; e
– o local onde os testes de garantia da qualidade devem ser realizados.

Exceto se de outra forma indicado, juntas longitudinais devem ser planejadas para coincidir com cada uma e todas as modificações em declive transversal através da largura da rodovia, independentemente das implicações sobre a largura da sobreposição.

Marcando o alinhamento horizontal

Antes de iniciar o trabalho de reciclagem, o alinhamento horizontal existente deverá ser marcado com uma série de estacas (ou postes) colocadas em cada lado da estrada. Estas estacas (ou postes) devem ser posicionadas fora da área de trabalho a uma distância constante e perpendicularmente à linha central e devem ser usados para restabelecer a linha central após a conclusão das operações de reciclagem. A distância entre as sucessivas estacas (ou postes) não deverá exceder 20 m em curvas, ou 40 m em tangentes (retas).

Preparando a superfície

Antes de iniciar o trabalho de reciclagem, a superfície da rodovia existente deverá ser preparada:

– limpando toda a vegetação, lixo e outros materiais estranhos em toda a largura da estrada, incluindo pistas adjacentes ou acostamentos que não serão reciclados;
– removendo águas paradas;
– fresando previamente os pontos altos que devem ser removidos (se necessário); e
– marcando exatamente as linhas de corte longitudinais na superfície de rodovia existente.

Além disso, o empreiteiro deverá registrar o local de todas as marcações da estrada (por exemplo, extensão das linhas de barreira) que serão eliminadas pela reciclagem.

Requisitos da forma e nível da superfície

Exceto se de outra forma indicado, os desenhos do projeto não serão emitidos detalhando as exigências de nível final para a superfície da estrada recuperada. Quando a linha de nível e a forma da seção transversal da estrada existente não estiverem excessivamente distorcidas, o empreiteiro será responsável por conduzir suas operações de maneira a garantir que os níveis da superfície da camada reciclada concluída são compatíveis com aqueles existentes antes da reciclagem. Quando os defeitos da superfície tiverem que ser corrigidos e/ou modificações tiverem que ser feitas na linha do leito, instruções serão dadas detalhando as novas exigências de nível da nova superfície. Isso pode ser alcançado antes de reciclar, tanto fresando previamente para remover o material in situ ou importando o material e espalhando-o com precisão na superfície da rodovia existente.

Adição de material importado

Quando o projeto exigir material importado como material estrutural com a finalidade de dar forma à correção, o material prescrito deve ser importado e espalhado na superfície da rodovia existente antes da reciclagem. O método de colocação e espalhamento do material importado deverá alcançar os níveis de superfície exigidos e, portanto, podem exigir o uso de uma pavimentadora, motoniveladora ou outra usina. Se a espessura do material importado ultrapassar a profundidade de reciclagem pretendida, então os requisitos para a correção da forma terá que ser modificado pelo renivelamento da superfície rodoviária em cada lado do ponto baixo.

Se o projeto exigir a importação de material com a finalidade de alterar o nivelamento do material reciclado ou realizar uma modificação mecânica, o material prescrito deverá ser importado e espalhado na superfície da rodovia existente como uma camada com espessura uniforme antes da reciclagem.

Pré-fresagem

Onde necessário, a pré-fresagem deve ser realizada por uma fresadora (não por uma recicladora) para:

- Remover o material da rodovia. Pontos elevados isolados devem ser removidos e/ou modificações menores deverão ser feitas para elevar curvas verticais pela fresagem precisa. O material resultante de tais operações de fresagem deve ser carregado sobre caminhões e removido do local.
- Quebrar (pulverizar) camadas finas de asfalto. Camadas de asfalto com muitas rachaduras (rachaduras crocodilo em toda a profundidade em intervalos de < 100 mm), e/ou as seções onde camadas finas sobrepostas de asfalto estiverem perdendo a laminação. devem ser previamente fresadas imediatamente antes da operação de reciclagem. Para garantir que a operação de fresagem alcançar o grau de pulverização necessário, a profundidade da fresagem deve ser constantemente monitorada e ajustada de maneira a que a parte inferior do tambor de fresagem permaneça na metade inferior da camada de asfalto rachada/que está se separando.

  O material asfáltico pulverizado gerado por tal pré-fresagem deverá permanecer na rodovia, atrás da fresadora, onde deverá ser espalhado através da largura da reciclagem e laminado com um rolo de tambor liso.

Quando um grau de pulverização aceitável não for possível, a máquina deve ser operada em reverso (isto é, cortando para baixo) com os mesmos controles aplicados à profundidade da fresagem. Se a fresagem reversa não produzir um grau aceitável de pulverização, a camada de asfalto imprópria deve ser fresada e removida.

Pré-pulverização do material do pavimento existente

A pré-pulverização somente deve ser realizada com a finalidade de:

- quebrar material excessivamente duro;
- soltar o material ao longo da largura da rodovia de maneira a que ele possa ser misturado pela motoniveladora;
- expor o material solto (fluffed-up) à atmosfera para promover a sua secagem; ou
- soltar o material no pavimento existente de maneira a que possa ser carregado e removido do local.

A profundidade da pré-pulverização deve ser cuidadosamente controlada durante toda a operação para garantir que o horizonte de corte sempre permaneça, no mínimo, 50 mm acima do fundo do próximo horizonte de reciclagem / estabilização.

A menos que o objetivo da pré-pulverização seja secar o material, o caminhão tanque de água deverá ser acoplado à recicladora e água suficiente deve ser adicionada para permitir que o material seja compactado até uma densidade mínima de 95% da densidade AASHTO modificada. Exceto onde o material tiver que ser misturado de forma cruzada, o mesmo deverá ser compactado imediatamente atrás da recicladora, utilizando uma motoniveladora para pré-modelar o material de acordo com as exigências do nível final. Quando for encomendada uma mistura cruzada, o material deve ser laminado por uma niveladora em toda a largura especificada para obter uma mistura uniforme do material antes de o material ser compactado e modelado.

A3.4.3 Adição de agentes estabilizantes

O tipo de agente estabilizante e a taxa de aplicação exigida, expressa como um percentual da massa de material a ser estabilizado, normalmente serão determinados a partir dos testes do projeto da mistura realizados antes do início da obra e fornecidos ao Empreiteiro como uma instrução.

Agentes estabilizantes químicos (cimento e cal)

O método de aplicação de agentes estabilizantes químicos deverá ser decidido pelo empreiteiro e pode ser:

– espalhar uma camada uniforme de agente estabilizante seco na superfície preparada da rodovia antes da reciclagem; ou
– fluidificar como pasta misturando previamente com água e bombeando para a recicladora para injeção através de uma barra espargidora no processo de mistura; ou
– pré-misturar em uma usina "batch" e espalhar na superfície uniformemente sobre a superfície da rodovia, juntamente com o material importado.

Agentes de estabilização secos deverão ser espalhados uniformemente sobre toda a largura da rodovia a ser reciclada durante cada passagem da recicladora, tanto por meio de uma espalhadora mecânica na taxa prescrita de aplicação como um processo contínuo, ou manualmente. Quando o espalhamento for feito manualmente, as bolsas do agente estabilizante devem ser espaçados em intervalos iguais ao longo de cada corte individual. As bolsas devem ser esvaziadas e os conteúdos espalhados uniformemente ao longo de toda a área do corte, excluindo todas as sobreposições.

Misturadoras operadas mecanicamente devem ser utilizadas para a manufatura de pasta a partir de agentes estabilizantes pulverizados secos e água. A misturadora deve estar equipada com uma peneira com aberturas não maiores de 5 m, e deve ser capaz de produzir uma pasta com consistência uniforme e um teor de água constante na taxa exigida para a estabilização.

Agentes estabilizantes de betume

O agente estabilizante de betume deve ser adicionado ao processo de reciclagem pelo bombeamento a partir de um caminhão tanque empurrado à frente da recicladora. Quando espuma de asfalto for aplicada, os caminhões tanque devem estar equipados com um termômetro embutido e dispositivos de aquecimento para garantir a manutenção do betume a 5º C da temperatura de aplicação especificada. O betume aquecido acima da temperatura máxima especificada não deverá ser utilizado e deverá ser removido do local.

Uma amostra de um litro de agente estabilizante de betume será retirada de cada caminhão tanque e retida em uma lata vedada para teste posterior.

A frase a seguir deve ser incluída ao trabalhar com espuma de asfalto:

Não após dois (2) minutos depois do início da reciclagem com cada nova carga do caminhão tanque, as características da formação de espuma do betume deverão ser verificadas utilizando o bocal de teste da recicladora.

Adição de agentes estabilizantes fluidos

O sistema de bombeamento necessário para injetar um agente estabilizante fluido no processo de mistura deverá ser controlado pelo mesmo sistema com microprocessador que monitora a velocidade de deslocamento para o controle da adição de água.

Controlando o teor de umidade do material reciclado

Água suficiente deverá ser adicionada durante o processo de reciclagem para atender às exigências de umidade especificadas abaixo. A água deverá ser adicionada somente por meio do sistema de controle com microprocessador na recicladora e cuidados especiais devem ser adotados para evitar que qualquer parte da obra fique excessivamente molhada. Qualquer parte do trabalho que ficar muito molhada será rejeitada e o empreiteiro deverá ser responsável pela correção do teor de umidade secando e reprocessando o material, juntamente com o agente estabilizante novo sempre que um agente estabilizante de cimento for utilizado, tudo à sua própria custa.

No momento da compactação, o tipo de agente estabilizante empregado deverá regular o teor de umidade do material reciclado:

i) O teor de umidade durante a compactação nunca deverá ultrapassar 75% do teor de umidade da saturação do material natural (antes da estabilização), calculado como Densidade Seca Máxima. O teor de umidade no grau especificado de saturação deverá ser determinado utilizando a seguinte fórmula:

$$W_v = S_r \times \{(X_w / X_d) - (1.000 / G_s)\}$$

onde:

W_v = teor de umidade do material a um grau especificado de saturação (%)
S_r = grau especificado de saturação (%)
X_w = densidade da água (kg/m^3)
X_d = densidade seca máxima do material natural (kg/m^3)
G_s = densidade aparente do material (kg/m^3)

ii) Agentes estabilizantes não derivados de cimento e material reciclado sem agentes estabilizantes

iii) Agentes estabilizantes de emulsão betuminosa
O teor total de fluido do material durante a compactação não deverá ultrapassar o teor ideal de fluido. O teor total de fluido deverá ser determinado somando a quantidade total de emulsão betuminosa aplicada (não somente a fração de água) ao teor de umidade in situ antes da mistura, mais toda a outra água aplicada independente da fração de água da emulsão.

A3.4.4 Reciclagem

A máquina de reciclagem deverá ser configurada e operada para garantir o atendimento dos seguintes requisitos principais:

- **Classificação granulométrica do material reciclado**
  A velocidade de avanço de uma recicladora, a taxa de rotação do tambor de fresagem e o posicionamento do feixe de controle da gradação devem ser ajustados de maneira a que o material in situ seja quebrado com uma classificação aceitável. O empreiteiro deverá adotar todas as medidas necessárias para garantir que a granulometria resultante do processo de reciclagem cumpra com o estabelecido durante a Seção Experimental, conforme descrito na cláusula A3.5 abaixo.

- **Adição de água e agentes estabilizantes fluidos**
  O sistema de controle por microprocessador para a adição de água e agentes estabilizantes fluidos deve ser ajustado e monitorado com cuidado para garantir a conformidade com as exigências relacionadas à umidade da compactação e conteúdo do estabilizador. Quando possível, caminhões tanque devem ser medidos ao final de cada corte para verificar o uso real em comparação com a demanda teórica calculada.

- **Controle da profundidade de corte**
  A profundidade real do corte deverá ser medida fisicamente submergindo uma linha de nível puxada entre os postes de controle da pesquisa, no mínimo, uma vez ao longo de cada 100 m do comprimento de corte e utilizando as mesmas referências dos postes de controle da pesquisa que serão utilizados para obter os níveis finais da superfície.

- **Sobreposição em juntas longitudinais**
  Para garantir a reciclagem completa em toda a largura da rodovia, juntas longitudinais entre cortes sucessivos devem se sobrepor por um mínimo de 150 mm. As linhas de corte previamente marcadas na superfície da rodovia devem ser verificadas para garantir que somente o primeiro corte é da mesma largura que o tambor de fresagem. Todas as larguras de cortes sucessivos devem ser, pelo menos,

150 mm mais estreitas do que a largura do tambor de fresagem. A máquina de reciclagem deverá ser dirigida de maneira a seguir com precisão as linhas de corte pré-marcadas. Qualquer desvio superior a 100 mm deverá ser corrigido imediatamente voltando ao local onde o desvio iniciou e reprocessando ao longo da linha correta, sem a adição de qualquer água adicional ou agente estabilizante.

A largura da sobreposição deverá ser confirmada antes de iniciar cada nova sequência de corte e todos os ajustes feitos para garantir que a quantidade de água e de agente estabilizante fluido a ser adicionada seja reduzida proporcionalmente de acordo com a largura da sobreposição.

- **Continuidade da estabilização (juntas laterais)**
  O empreiteiro deverá garantir que entre cortes sucessivos (ao longo da mesma linha de corte longitudinal) não sobre qualquer espaço com material não reciclado, e que nenhum espaço não tratado seja criado onde o tambor fresador entrar pela primeira no material existente. O local exato onde cada corte termina deve ser marcado com cuidado. Esta marca deverá coincidir com a posição do centro do tambor misturador no ponto em que a alimentação de agente estabilizante cessou. Para garantir a continuidade da camada estabilizada, o próximo corte sucessivo deverá ser iniciado, no mínimo, a 0,5 m (500 mm) atrás desta marca.

- **Velocidade de avanço**
  A velocidade do avanço deverá ser verificada e registrada, no mínimo, uma vez a cada 200 m do corte para garantir a conformidade com a taxa de produção planejada e para o cumprimento contínuo com o processo de reciclagem. Os limites de tolerância aceitáveis deverão depender do tipo de recicladora e do material sendo reciclado, mas não devem ser inferiores a 6 m/min, nem superiores a 12 m/Min.

A3.4.5 Instabilidade do subleito

Quando a instabilidade do subleito for identificada por investigações preliminares, ou durante o processo de reciclagem, ela deverá ser tratada:

- recuperando o material nas camadas do pavimento sobrepostas ao material instável por meio da fresagem ou escavação e carregamento em caminhões para transporte para armazenagem provisória;
- escavando o material instável até a profundidade prescrita, e removendo o entulho;
- tratando o leito exposto da rodovia, conforme especificado; e
- aterrando a escavação utilizando o material armazenado temporariamente e material importado.

O aterramento deverá ser realizado em camadas não mais espessas do que 200 mm após a compactação e deverá continuar em camadas sucessivas utilizando material apropriado para cada camada. Quando o aterro estiver completo, a reciclagem deverá ser reiniciar.

A3.4.6 Compactação e acabamento

Compactação inicial

O material reciclado deverá ser rolado inicialmente utilizando um rolo vibratório pesado para alcançar a compactação especificada. A rolagem deverá iniciar imediatamente atrás da recicladora e seguir a sequência predeterminada descrita na cláusula A3.5 abaixo.

O controle de densidade deverá ser aplicado:

– à densidade média obtida co longo de toda a espessura da camada; e
– à densidade dos dois terços inferiores da camada, a qual não deverá ser inferior à densidade média de toda a espessura da camada, menos 2%.

Alternativamente, quando a densidade de recusa for especificada, o seguinte deve ser incluído:

O material reciclado deverá ser inicialmente rolado utilizando um rolo vibratório pesado equipado com um sistema de compactômetro integrado. O esforço da compactação deverá ser aplicado ao material reciclado imediatamente atrás da recicladora, somente em modo de vibração de alta amplitude. Seções sucessivas, não mais extensas do que 100 m, deverão ser compactadas e roladas em cada seção até que o sistema de compactômetro integrado indique que a densidade máxima foi alcançada antes de o rolo se movimentar para a próxima porção.

Controle do nível e da forma

O material processado deverá ser espalhado pela recicladora para encher o vazio do corte. Tal espalhamento pode ser obtido por uma mesa presa à traseira da recicladora (máquinas montadas sobre esteiras), ou aplicando pressão suficiente à porta traseira da câmara de reciclagem para garantir que o material se espalhe por toda a largura do corte (máquinas montadas sobre pneus). O material espalhado deverá ser então compactado inicialmente (como descrito acima) antes de cortar os níveis finais com uma motoniveladora, utilizando como referências os postes de controle da pesquisa

Compactação final, irrigação, acabamento e cura

Após dar a forma final, um rolo vibratório com tambor liso operando em modo de vibração de baixa amplitude deverá completar o processo de compactação. A superfície da rodovia será então tratada com uma leve aplicação de água, ou de emulsão betuminosa diluída onde especificado, e rolada com um rolo sobre pneus para obter uma textura estreitamente ligada. A superfície da camada reciclada concluída deverá ser mantida continuamente úmida pela irrigação frequente.

A camada final concluída não deverá conter:
– laminações de superfície (ou “biscoitos”);
– partes exibindo segregação de agregados fino e graúdos; e
– corrugações, ou qualquer outro defeito que puder afetar adversamente o desempenho da camada.

Um revestimento com betume (asfalto ou vedante) não deverá ser aplicado à superfície até que o teor de umidade do material no horizonte superior de 100 mm da camada reciclada esteja abaixo de 50% do teor ideal de umidade do material.

- **Abertura ao tráfego**
  Exceto se de outra forma instruído, toda a largura da rodovia poderá ser aberta ao tráfego fora do horário de trabalho diurno normal. Todos os sinais provisórios e outros dispositivos de controle do tráfego devem ser colocados antes da rodovia ser aberta ao trânsito.

A3.5 Seções de ensaios

As seções de ensaios devem sempre ser especificadas, pois forçam o empreiteiro a testar antes do início da obra de reciclagem. A seguinte frase é normalmente é incluída:

No início do projeto o empreiteiro deverá montar todos os itens da usina e equipamentos que ele pretende utilizar para a reciclagem a frio no local, e deverá processar a primeira seção da rodovia a ser recuperada para:

- demonstrar que o equipamento e os processos propostos são capazes de construir a camada reciclada de acordo com as exigências especificadas;
- determinar o efeito do nivelamento do material reciclado variando a velocidade de avanço da recicladora e a taxa de rotação do tambor de fresagem; e
- determinar a sequência e a maneira de rolagem necessárias para atender às exigências mínimas de compactação.

Uma Seção de Ensaio deverá ter, no mínimo, 200 m do comprimento de toda a largura da pista ou da metade da rodovia. Se o empreiteiro fizer qualquer alteração nos métodos, processos, equipamentos ou materiais utilizados, ou se não for capaz de cumprir consistentemente com as especificações devido a mudanças no material in situ, ou por qualquer outra razão, demonstrações adicionais poderão ser demandadas antes de dar seguimento à obra permanente.

A3.6 Proteção e manutenção

A seguinte frase padrão usualmente é incluída:

O empreiteiro deverá proteger e manter a camada reciclada completa até a próxima camada ou revestimento serem aplicados. Além de uma irrigação leve frequente para impedir que a superfície seque, a manutenção deverá incluir o reparo imediato de todos os danos ou defeitos na camada, sendo repetida tantas vezes quantas forem necessárias. Os reparos devem ser realizados para assegurar uma superfície regular e uniforme, que possa ser restaurada após a conclusão dos trabalhos de reparos. O custo de tais reparos deverão ser de responsabilidade do empreiteiro, exceto se os danos forem resultantes de desgaste causado pelo uso antecipado. Danos causados por tráfego prolongado em consequência de um atraso na aplicação da próxima camada ou revestimento não devem ser considerados desgaste se tal atraso for devido a condições sob o controle do empreiteiro.

A3.7 Tolerâncias da construção

A seguir temos uma especificação típica de níveis de superfície:

Um tamanho de lote deve ser de, no mínimo, 50 níveis, considerados como um padrão aleatório. O lote cumprirá com as exigências especificadas se o mesmo atender às seguintes tolerâncias:

A3.7.1 Níveis da superfície

A seguir temos uma especificação típica de níveis de superfície:

Um tamanho de lote deve ser de, no mínimo, 50 níveis, considerados como um padrão aleatório. O lote cumprirá com as exigências especificadas se o mesmo atender às seguintes tolerâncias:

- $H_{90} \leq 20$ mm mm (isto é, no mínimo, 90% de todos os níveis da superfície medidos estão dentro de 20 mm, mais ou menos, dos níveis especificados); e
- $H_{max} \leq 25$ mm (isto é, níveis de pontos individuais não devem se desviar mais de 25 mm dos níveis especificados).

A3.7.2 Espessura da camada

Como a espessura da camada estabilizada é um dos determinantes mais importantes do desempenho final, tolerâncias relativamente restritas devem ser especificadas, conforme mostrado nos seguinte exemplo:

O tamanho de um lote deve ter uma medida de espessura da camada de, pelo menos, 20. O lote cumprirá com as exigências especificadas se o mesmo atender às seguintes tolerâncias:

- $D_{90} \geq 10$ mm (isto é, pelo menos, 90% de todas as medições da espessura são iguais ou superiores à espessura especificada menos 10 mm);
- $D_{mean} \geq D_{spec} - (D_{spec}/20)$ (isto é, a espessura média da camada para o lote não deve ser menor do que a espessura especificada da camada, menos a espessura especificada da camada dividida por vinte); e
- $D_{max} < 15$ mm (isto é, nenhuma medida da espessura da camada individual deve ser menos do que a espessura especificada menos 15 mm).

A3.7.3 Larguras

Em parte alguma a largura da camada reciclada deve ser menor do que a largura especificada.

A3.7.4 Corte transversal

Quando testada com uma régua de 3 m colocada em ângulo reto com a linha central da rodovia, a superfície não deve desviar-se da parte inferior da régua por mais de 10 mm. Em qualquer seção transversal, a diferença no nível entre dois pontos não deve variar da sua diferença de nível computada a partir da seção transversal em mais de 15 mm.

A3.7.5 Regularidade da superfície

A seguinte é uma especificação típica da regularidade da superfície:

Ao testar a camada reciclada acabada, com uma régua de rolamento padrão, o número de irregularidades na superfícies não deve ultrapassar:

- seis (6) para o número médio de irregularidades por 100 m igual ou superiores a 6 mm quando medidos ao longo de comprimentos de 300 m a 600 m; e
- oito (8) para o número de irregularidades igual ou superior a 6 mm quando medidos ao longo de uma única seção de 100 m.

Todas as irregularidades individuais medidas com a régua de rolagem, ou com uma régua de 3 m colocada paralelamente à linha central de rodovia, não devem exceder 10 mm. No entanto, quando puder ser demonstrado que as irregularidades são causadas por fatores além do controle do empreiteiro (por exemplo, danos causados pelo tráfego antecipado), esta exigência poderá ser dispensada.

A3.8 Inspeção e testes de rotina

O ônus de produzir uma obra em conformidade com a qualidade e com precisão de detalhes, atendendo a todas as exigências das especificações e desenhos, é do empreiteiro. Portanto, o empreiteiro é responsável por instituir um sistema de controle da qualidade para garantir o controle positivo dos trabalhos e demonstrar que as exigências especificadas foram atendidas.

Excluindo-se os detalhes geométricos (descritos acima em “Tolerâncias da Construção”), três parâmetros adicionais importantes do trabalho de reciclagem exigem um controle cuidadoso, a saber:

- a taxa de aplicação dos agentes estabilizantes;
- a resistência obtida no material reciclado / tratado; e
- a densidade alcançada na nova camada reciclada.

Estas questões são abordadas abaixo em subseções separadas.

A3.8.1 Taxa de aplicação dos agentes estabilizantes

Devido à variabilidade dos pavimentos deteriorados existentes, o material reciclado raramente é homogêneo. Testes normais para confirmar que a taxa da quantidade exigida de agente estabilizante foi aplicada é frequentemente imprópria pois produz resultados enganosos. Por exemplo, calcular o teor de betume como um percentual por massa de material reciclado com espuma de asfalto não pode fornecer uma resposta quanto à quantidade de espuma de asfalto realmente adicionada, porque:

- a quantidade de betume extraída de tal mistura pode variar consideravelmente devido à presença de betume no pavimento existente (no asfalto existentes, em camadas de revestimento adicionais e em remendos);
- expressar o teor de betume como um percentual da massa total da mistura é um conceito emprestado da tecnologia do asfalto, pois presume que o agregado está em conformidade com uma granulometria uniforme. Como o material reciclado possui uma granulometria variável, a inclusão ou exclusão de uma peça grande de agregado modificará significativamente o percentual de betume na amostra, tornando o resultado irrelevante.

Medidas de controle alternativas são, portanto, necessárias e estas normalmente se baseiam em verificações do consumo, ou medições físicas da quantidade real de agente estabilizante aplicada, em comparação com a taxa de aplicação especificada.

Estabilização do cimento

Quando o cimento for espalhado manualmente sobre a superfície da rodovia existente antes da reciclagem, verificar a taxa de aplicação é relativamente fácil, pois a superfície é previamente marcada para os sacos individuais.

Quando um espargidor é utilizado para aplicar o cimento na superfície de rodovia existente antes da reciclagem, o teste padrão “tela- remendo”, ou similar, é usado normalmente para verificar a taxa de aplicação.

Quando o cimento for aplicado por meio da injeção de pasta, o consumo real de cimento (e água) pode ser obtido do computador que controla a unidade de mistura da pasta. Além disso, certificados de plataformas de pesagem devem ser obtidos na entrega de cimento a granel, e comparados com o uso diário indicado pelo computador.

Estabilização com betume

O consumo real de emulsão betuminosa e espuma de asfalto é mais bem controlado assegurando que todos os caminhões tanque que entregam o produto à recicladora sejam fornecidos com certificados da plataforma de pesagem para cada carga. A massa de material estabilizado em cada caminhão tanque (estimada a partir do comprimento do corte, multiplicado pela largura da aplicação, profundidade de corte e densidade pressuposta do material), o corte então deve ser reconciliado com a quantidade consumida, desde que o caminhão tanque seja sempre drenado.

A3.8.2 Resistência do material estabilizado

Uma amostra da massa (± 200 kg) é normalmente retirada da traseira da recicladora, pelo menos, uma por 2.500 m^2 de pavimento reciclado. Este material é colocado em um recipiente vedado e levado imediatamente ao laboratório para testes.
Os testes normais incluem:

- teor de umidade;
- relação umidade / densidade para determinar a densidade seca máxima (também utilizada para determinar o percentual de compactação obtido no campo;
- determinação da resistência a partir de amostras manufaturadas de briquetes. (Observe que o teor de umidade do material é sempre ajustado ao teor ideal de umidade antes de manufaturar os briquetes com esforço de compactação padrão. Além disso, a temperatura do material sendo compactado deve ser similar à do campo).

Outros testes que são algumas vezes exigidos incluem a análise de peneira e a determinação da plasticidade.

Quando houver razão para suspeitar que a resistência necessária não foi alcançada, um núcleo de 150 mm de diâmetro pode ser extraído da camada e testado. Isso é normalmente realizado cerca de 2 a 4 semanas após a construção da camada. Esta

Vide Apêndice 1 para procedimentos de teste detalhados.

A3.8.3 Densidade alcançada

A determinação da densidade em campo de uma camada construída a partir de material reciclado, raramente é um exercício simples, devido a duas características do material reciclado:

- variabilidade do material reciclado que afeta o valor máximo da densidade seca em comparação com a densidade em campo; e
- betume naquela parcela do material reciclado a partir de asfalto existente e/ou revestimento em betume, que afetem a leitura do teor de umidade de medidores do núcleo..

Amostras representativas devem ser recolhidas em cada uma e em todos os locais de teste e testadas em laboratório para determinar a densidade máxima seca do material e o teor de umidade em campo. Isso invariavelmente aumenta a carga de trabalho do laboratório de campo e causa um atraso na obtenção dos resultados.

Além disso, quando a densidade especificada não for alcançada, isso poderá ser uma razão para suspeitar que um suporte subjacente ruim possa estar contribuindo para tornar praticamente impossível obter uma densidade mais alta do que aquela já alcançada. Esta é uma fonte potencial de conflitos que exige testes adicionais (normalmente, uma pesquisa DCP limitada).

O sistema integrado de compactômetro instalado no rolo principal foi adotado recentemente em projetos de reciclagem para indicar quando a densidade de recusa foi alcançada. Este sistema simples oferece uma solução para os problemas descritos acima e, portanto, é recomendado para controlar a densidade em campo. A seguir temos um exemplo de especificação para tal equipamento:

A densidade necessária é a “densidade de recusa” e deve ser definida como a densidade máxima passível de alcançar em campo, conforme indicado por um sistema de compactômetro integrado. Tal sistema deve ser adaptado ao rolo vibratório com tambor único utilizado para a compactação inicial atrás da recicladora. A rolagem deve continuar até a unidade indicar que nenhuma densificação adicional está sendo obtida por passagens adicionais do rolo. Esta informação deve ser armazenada no computador do sistema, downloaded diariamente e utilizada para gerar um registro abrangente da compactação, indicando o nível de compactação realmente alcançado a cada 2 m do corte, juntamente com a comprovação de que foi obtida a densificação máxima.

Testes de verificação utilizando métodos normais ainda são exigidos para a camada concluída, mas em uma intensidade muito reduzida, normalmente 6 testes por trabalho do dia.

A3.9 Medição e pagamento

Para evitar quaisquer argumentos, o seguinte deve ser sempre incluído:

A descrição de certos itens pagos indica que as quantidades serão determinadas a partir das "dimensões autorizadas". Isso deve ser considerado como significando as dimensões especificadas ou mostradas em algum desenho ou instrução escrita entregue ao empreiteiro, sem qualquer margem para tolerâncias. Se a obra for construída em conformidade com as dimensões autorizadas, mais ou menos as tolerâncias permitidas, as quantidades serão calculadas a partir das dimensões autorizadas.

A3.9.1 Itens de medição

Cada item a ser utilizado para a medição (e pagamento) da obra de reciclagem exige uma definição completa. Os seguintes são exemplos de itens típicos:

Item	**Unidade**
A3.01 Preparar a superfície existente da rodovia antes de reciclar	metro quadrado (m^2)

A unidade de medição deve ser o metro quadrado da superfície da rodovia já existente que deve ser recuperada pela reciclagem, calculada a partir da dimensão da largura autorizada, multiplicada pelo comprimento real medido ao longo da linha central da rodovia.

O valor ofertado deve incluir a remuneração total de todo o trabalho necessário para limpar a rodovia de toda a água, vegetação, lixo e outros materiais estranhos e para remover, transportar e descartar todos os entulhos resultantes, conforme especificado.

Item	**Unidade**
A3.02 Reciclagem total in situ de materiais do pavimento	
para a construção de novas camadas de pavimento:	
a) .....mm (especificar) de espessura da camada concluída:	
i) Largura da rodovia de 5,0 m ou menos	metro cúbico (m^3)
ii) Largura da rodovia superior a 5,0 m, mas inferior a 6,0 m.	metro cúbico (m^3)
iii) etc. para incrementos de 1m da largura da rodovia.	
b) etc. para cada espessura de camada especificada.	

A unidade de medida deve ser o metro cúbico da camada de pavimento concluída, construída pela reciclagem do material do pavimento in situ, independentemente da dureza ou tipo de tal material, e com ou sem a inclusão do material importado. A quantidade deve ser calculada a partir das dimensões autorizadas para a largura e espessura da camada concluída, multiplicadas pelo comprimento real medido ao longo da linha central da rodovia.

A largura autorizada não deve ser aumentada para incluir qualquer permissão para a sobreposição mínima especificada entre cortes adjacentes, nem para o número de corte necessário para cobrir toda a largura da rodovia. Os valores ofertados devem incluir a remuneração total pela preparação da obra, pela reciclagem de todos os tipos de materiais na estrutura do pavimento existente até a profundidade especificada, juntamente com todos os agentes estabilizantes e/ou material importado que tenham que ser incorporados, pelo fornecimento ou adição de água, pela mistura, colocação e compactação do material, pelo retrabalho de todo o material em cortes adjacentes sobrepostos, independentemente do número de cortes ou largura da sobreposição, necessários para cobrir toda a largura da rodovia, por toda a cura, proteção e manutenção da camada, e pela condução de todo o processo e inspeções de controle da aceitação, medição e testes.

Item	Unidade
A3.03 Extra além do Item A3.02	
para camadas de material asfáltico dentro da porção reciclada do pavimento existente, onde a espessura média do asfalto é de:	
a) Mais de 50 mm, mas menos ou igual a 75 mm	metro cúbico (m^3)
b) Mais de 75 mm, mas menos ou igual a 100 mm	metro cúbico (m^3)
c) Etc. para incrementos de 25 mm.	

A unidade de medida deve ser é a mesma que para o item A3.02, sendo a medida extra aplicada á espessura de toda a camada, independentemente das proporções relativas do asfalto e de outro material que constitua o material na espessura total da camada fresada. Nenhum pagamento adicional deve ser efetuado quando a espessura do asfalto for menor ou igual a 50 mm.

Os valores ofertados devem incluir a remuneração total por todos os custos diretos e indiretos adicionais, incorridos em consequência da reciclagem de material que inclua camadas de asfalto com espessura superior a 50 mm. Estes custos adicionais devem incluir, mas não se limitar a desgaste adicional da usina e equipamentos, ferramentas adicionais, e custos extras incorridos quando a taxa de avanço indicar que o pavimento deve ser previamente fresado antes da estabilização, e todos os atrasos causados pela resultante lentidão na produção.

Item	Unidade
A3.04 Material importado para adição ao processo de reciclagem a frio no local:	
a) Produtos de pedra britada de fontes comerciais:	
i) Tamanho e descrição do produto britado	ton (t)
ii) Etc. para cada tamanho e tipo de produto.	
b) Cascalho natural e areia de fontes comerciais:	
i) Tamanho e descrição do produto natural	metro cúbico (m^3)
ii) etc. para cada tipo de material natural.	
c) etc. para cada tipo diferente de material importado.	

A unidade de medida para produtos de pedra britada adquiridos de fontes comerciais deve ser a tonelada de material levada ao local e incorporada no material reciclado. A medição deve se basear em tickets de plataformas de pesagem. A unidade de medida para o material natural, adquirido de fontes comerciais ou obtido a partir de poços emprestados, deve ser o metro cúbico, medido como 70% do volume do veículo de transporte.

O valor ofertado deverá incluir a remuneração total pela aquisição, fornecimento e espalhamento do material importado sobre a rodovia existente, como uma camada de correção do nível, ou como uma camada de espessura uniforme, pelo transporte do material desde o ponto de fornecimento até a sua posição final na rodovia, pela irrigação e rolagem leve quando necessário, e por qualquer deterioração.

Item	Unidade
A3.05 Filler ativo:	
a) Cimento Portland comum	ton (t)
b) Etc. para cada tipo de agente estabilizante químico especificado.	

A unidade de medida deve ser a tonelada de filler ativo realmente consumida no processo de reciclagem. A medição deve se basear em tickets de plataformas de pesagem quando o fornecimento for a granel, ou em contagens convencionadas sempre que o fornecimento for feito em sacos ou bolsas.

O valor ofertado deverá incluir a remuneração total pela aquisição e fornecimento do filler ativo, pela sua adição ao processo de reciclagem, incluindo todo o transporte, manuseio, armazenagem coberta quando necessário, novo manuseio e espalhamento, ou fluidificação em uma pasta e bombeamento no processo, por toda a deterioração e medidas de segurança necessárias durante o manuseio, e pelo descarte de todas as embalagens.

Item	Unidade
A3.06 Agentes estabilizantes de betume:	
a) Emulsão betuminosa:	
i) 60% de betume residual, catiônico, lento	ton (t)
ii) Etc. para cada tipo diferente de emulsão betuminosa.	
b) Espuma de asfalto, produzida de:	
i) betume com grau de penetração de 80 / 100	ton (t)
ii) Etc. para cada tipo diferente de betume.	

A unidade de medida deve ser a tonelada de agente estabilizante de betume realmente consumida no processo de reciclagem. A medição deve se basear nas medições físicas com varetas submersas dos caminhões tanque, realizadas antes e após a aplicação do agente estabilizante betuminoso, com o respaldo de tickets da plataforma de pesagem emitidos para cada carga do caminhão tanque no ponto de fornecimento.

O valor orçado deverá incluir toda a remuneração pela aquisição e fornecimento do agente estabilizante de betume, pela sua adição ao processo de reciclagem, e outros produtos químicos e aditivos introduzidos, pela água adicionada para obter a espuma quando necessária, por todo o transporte, aquecimento, manuseio, armazenagem e aplicação por bombeamento no processo, por todo o desperdício e adoção das medidas de segurança necessárias durante o manuseio.

A3.9.2 Exemplo de uma programação típica das quantidades

A seguinte programação é um exemplo de programação de quantidades para um projeto de reciclagem incluindo os itens listados acima. As quantidades são para rodovias de 30 km de comprimento, 7,3 m de largura, recicladas até uma profundidade de 175 mm (o pavimento existente inclui uma camada de asfalto com 80 mm de espessura) estabilizada com 1% de cimento e 4% de emulsão betuminosa.

Item	Descrição	Taxa	Quantidade	Taxa	Valor
A3.01	Preparar a superfície existente da rodovia antes de reciclar	m^2	220.000		
A3.02	Reciclagem em todos os materiais do pavimento in-situ para a construção de novas camadas de pavimento: a) camada de 175 mm de espessura: i) Largura da rodovia >7,0 m, mas menos de 7.5 m	m^3	40.000		
A3.03	Extra além do Item A5.-2 para camadas de material asfáltico dentro da porção reciclada do pavimento existente, onde a espessura média do asfalto é de: a) mais de 75 mm, mas menos ou igual a 100 mm	m^3	40.000		
A3.04	Agentes estabilizantes químicos: a) Cimento Portland comum	ton	1.000		
A3.05	Agentes estabilizantes de betume: a) emulsão betuminosa i) 60% de betume residual, catiônico colocado lentamente	ton	4.000		

Apêndice 4 – Princípios da análise econômica

A4.1	Introdução	357
A4.2	Comparação dos custos com base no tempo	358
A4.3	Técnicas de avaliação econômica	360
A4.3.1	Técnica do valor atual do custo (PWoC)	361
A4.3.2	Técnica da razão Benefício / Custo (B / C)	362
A4.3.3	Técnicas da taxa interna de retorno (IRR)	363
A4.3.4	Técnica do valor líquido atual (NPV)	364
A4.4	Período de análise e valor final e residual das facilidades de transporte	365

A seguir temos um extrato das “Diretrizes para a Condução de uma Avaliação Econômica de Projetos de Transporte Urbano”, de WJ Pienaar, Universidade de Stellenbosch”.

A4.1 Introdução

A avaliação econômica é a estrutura conceitual para a avaliação de todos os ganhos (benefícios) e perdas (custos) de projetos de investimento, independentemente de para quem eles resultam em um país. Um benefício é considerado como qualquer ganho utilitário emanado da operação e uso de uma instalação, e um custo é a perda da utilidade associada com a implementação de um projeto, quando tal utilidade for medida em termos de custos de oportunidade. (O termo avaliação econômica não inclui a avaliação financeira e social).

O principal objetivo da avaliação econômica de projetos de transporte urbano, baseado na eficiência econômica e implementação de recomendações subsequentes é minimizar o custo total do transporte, desde que as necessidades de transporte sejam realimente alcançadas. O custo total do transporte de um projeto compreende custos recorrentes e não recorrentes. Custos não recorrentes abrangem o custo inicial (custo de planejamento, mais o custo da oportunidade de estabelecer uma facilidade). Os custos recorrentes são continuamente incorridos durante todas da vida de serviço de uma facilidade e consistem dos custos do usuário da facilidade e dos custos da sua manutenção. Um aumento nos custos não recorrentes geralmente resulta em uma redução dos custos recorrentes, e vice-versa. A minimização dos custos de transportes pode, portanto, ser alcançada pela determinação da permuta ideal entre as categorias de custos.

Existem três critérios de avaliação sobre os quais a viabilidade do projeto pode se basear:

- Vantagem absoluta – que pode ser determinada pela técnica do valor líquido atual;
- Vantagem relativa – que é normalmente determinada através da técnica da razão benefício / custo ou pela técnica da taxa interna de retorno; e
- Custo total mínimo – que pode ser determinado pela técnica do valor atual dos custos.

A4.2 Comparação dos custos com base no tempo

Uma avaliação econômica de projetos de transporte alternativo requer avaliações de custos individuais com base no tempo, pois o dinheiro possui um valor de tempo contínuo. Assim, um valor X seria mais valioso agora do que, por assim dizer, em um ano. Esta maior relevância do poder atual de disposição de fundos, em comparação com um eventual poder de disposição do mesmo valor, é referida como a propensão da preferência de tempo. Apesar de a taxa de inflação ter uma influência sobre a intensidade da propensão da preferência de tempo, a prevalência da inflação, por sis ó, não é a causa para o dinheiro ter um valor de tempo. Mesmo em períodos sem inflação, há uma preferência de tempo ligada ao dinheiro, que se relaciona à renda média de uma comunidade originada de economias e investimentos. Assim sendo, um valor guardado no bolso onde não pode produzir um retorno, tem a oportunidade de crescer de forma alternativa negada. A preferência do tempo médio de um valor pode, portanto, ser igualada com a sua oportunidade ou custo alternativo, conforme refletido no retorno médio sobre o capital ao longo de um período.

Como as facilidades de transporte, tais como rodovias, possuem uma vida de serviço de vários anos, até mesmo décadas, o período de avaliação normalmente se prolonga por vinte ou mais anos. Os custos de manutenção e do usuário incorridos ao longo do período, se tornam manifestamente menos relevantes pois valores cada vez mais distantes são incorporados no processo de avaliação. O método de determinação do valor presente de fundos futuros é conhecido como desconto. A taxa utilizada para computar o valor atual de um custo no ano n é referido como a taxa de desconto, e represente o valor em tempo contínuo do dinheiro. Uma avaliação econômica somente é possível depois que todos os valores futuros tenham sido expressos em termos equivalentes, isto é, depois que tenha sido reduzidos ao seu valor em um ponto comum no tempo, por meio de uma taxa de desconto representativa.

A fórmula básica para descontar um único valor futuro ao seu valor atual se torna mais compreensível se o desconto for considerado como o inverso do cálculo de juros compostos ou, em outras palavras, a conversão do valor atual em valor futuro utilizando uma taxa de juros específica.

Se, digamos, o valor no tempo de uma quantia = i por cento ao ano, o seu valor atual (PW) no período de um ano aumentará para $PW(1 + i / 1\ 00)$.
Depois de dois anos os seu valor seria igual: $PW(1 +i / 100)(1 +i / 100) = PW(1 +i / 100)^2$.
Após três anos o PW teria aumentado até um valor equivalente a $PW(1 + i/100\}^3$, e assim por diante, até que após n anos, seria igual a $PW(1 + i/100)^n$.

Como o desconto é a recíproca do cálculo de juros, o cálculo aplicado a $PW(1 + I / 100)^n$ para descontar por um número de anos a i por cento, teria que ser invertido. Em outras palavras, teríamos que multiplicá-lo por $1 / (1 + i / 100)^n$ para obter o seu valor atual.
O termo $(1 + i / 100)^n$ é conhecido como a função dos juros, enquanto o seu oposto, a saber $1 / (1 + i / 100)^n$, é conhecido como a função de desconto ou o fator do valor presente.

A seguinte fórmula é utilizada para calcular o PW de um valor futuro (FA) ao final do ano n, a uma taxa de desconto de i por cento ao ano:

$$PW = FA/(1 + i)^n$$ (Equação A4.1)

onde:
PW = valor atual (valor no ano nil)
FA = valor futuro ao final do ano n
i = taxa de desconto anual como uma fração de 100
n = período de desconto em anos

A4.3 Técnicas de avaliação econômica

Os projetos propostos a serem avaliados podem ser divididos em dois grupos:

- Propostas mutuamente exclusivas. Propostas exclusivas são métodos alternativos de cumprir com a mesma função. A escolha de qualquer uma das propostas consequentemente excluirá todas as outras. A análise do custo-benefício de propostas mutuamente exclusivas envolve a seleção da alternativa mais eficiente, isto é, a com mais efetiva quanto ao custo.

- Projetos independentes. Estes cumprem com diferentes funções e, portanto, não são alternativas às outras. Exemplos de projetos independentes são: uma linha de transferência modal proposta no subúrbio X, o alargamento proposto de uma rua no subúrbio Y, e um intercâmbio do tráfego proposto no subúrbio Z. Mais de um projeto independente pode ser selecionado para implementação. Na verdade, é possível que todos os projetos independentes possam ser selecionados se forem todos economicamente justificados e se fundos suficientes estiverem disponíveis. A avaliação econômica de projetos independentes envolve a classificação de projetos economicamente justificados em termos do seu mérito econômico.

Várias técnicas, todas baseadas no princípio dos fluxos de caixa descontados, podem ser utilizadas na análise do custo-benefício. Quatro das técnicas mais comumente utilizadas são explicadas abaixo, a saber:

- Técnica do valor presente do custo (PWoC);
- Técnica da razão benefício / custo (B / C);
- Técnica da taxa interna de retorno (IRR
- Técnica do valor líquido atual (NPV).

Em termos da filosofia subjacente, estas técnicas podem ser classificadas em dois grupos. Para o primeiro grupo somente o custo de cada alternativa é calculado, com o argumento de que a alternativa com o menor custo seria superior. A técnica PWoC se enquadra neste grupo.

No segundo grupo de técnicas, tanto os benefícios como os custos das alternativas são calculados. Os benefícios são definidos como economias em custos recorrentes em relação à alternativa zero (isto é, a situação existente ou facilidade atual cuja melhoria ou substituição estão sendo investigadas). A filosofia subjacente das técnicas deste grupo, é de que uma alternativa será economicamente variável se os benefícios excederem os custos. O custo de um projeto pode ser definido como o custo de oportunidade de recursos econômicos sacrificados na implementação (fornecimento) do projeto. O método para identificar a melhor alternativa depende desta técnica específica. Três técnicas se enquadram neste grupo: o NPV, a razão B / C e a técnica de IRR.

A4.3.1 Técnica do valor atual do custo (PWoC)

Esta técnica seleciona a alternativa com o custo mais baixo dentre projetos mutuamente excludentes. Todos os custos econômicos (isto é, custos de oportunidade) associados com o fornecimento, manutenção e uso de cada alternativa possível são descontados até o seu valor atual. Dado o objetivo da eficiência econômica, a alternativa que gerar o PWoC mais baixo é considerada como a proposta mais eficiente em termos de custo (benéfica). O método pode ser expresso conforme segue:

$$PWoC = C_a + PW(M + U) \qquad \text{(Equação A4.2)}$$

onde:

PWoC = valor atual do custo

C_a = todos os custos iniciais incorridos na construção de uma facilidade, menos o valor residual descontado ao final do período da análise

PW(M + U) = valor atual de todos os custos de manutenção e do usuário da rodovia durante o período sob análise.

Observe-se que no caso de alternativa zero (isto é, facilidade existente cuja possível substituição ou melhoria estão sendo investigadas, e em comparação com a qual alternativas mutuamente excludentes são medidas), PWOC = PW(M + U).

A4.3.2 Técnica da razão Benefício / Custo (B / C)

Esta técnica seleciona a alternativa mais vantajosa determinando a razão entre os benefícios do projeto (isto é, economia anual em relação à alternativa zero) e custos descontados do projeto inicial. O benefício previsto durante o período de análise é determinado pela subtração do valor atual dos custos do usuário da rodovia previstos para a alternativa, mais custos de manutenção da rodovia, desde o valor atual dos custos do usuário previstos para a facilidade existente, mais custos de manutenção.

A razão entre a soma dos benefícios descontados e a soma dos custos do projeto inicial é obtida dividindo a primeira pela última. Todas as propostas com um valor de razão superior a um são viáveis, mas aquela com o valor de razão mais alto é economicamente a mais vantajosa. Contudo, quando alternativas mutuamente exclusivas são comparadas, uma análise adicional deve ser utilizada para identificar a alternativa mais econômica. O método pode ser expresso conforme segue:

$$B/C = [PW (M_O + U_O) - (PW (M_a + U_a)]/C_a$$ (Equação A4.3)

onde:
B/C = razão benefício / custo
o = facilidade existente
a = alternativa sob análise

A4.3.3 Técnica da taxa interna de retorno (IRR)

Esta técnica calcula a taxa interna de retorno prevista de cada alternativa em relação à alternativa zero. Uma característica diferencial desta técnica é que a sua aplicação não inclui um procedimento singular de desconto com somente uma taxa indicada.

Economias anuais ("retornos") para o período sob análise são descontadas até o início do período. A soma destes valores descontados é comparada com o custo inicial descontado. Diferentes taxas de retorno são selecionadas repetidamente e aplicadas a certa taxa, e a soma dos retornos descontados anuais se iguale aos custos iniciais. Isso é então referido como a taxa interna de retorno (prevista). A alternativa com a taxa interna de retorno maior pode ser considerada como a mais vantajosa, embora o critério real seja comparar a taxa assim obtida com a taxa de desconto real prevalente. Se essa exceder a taxa de desconto prevalente, a alternativa é economicamente viável. Contudo, quando alternativas mutuamente exclusivas são comparadas, uma análise adicional deve ser utilizada para identificar a alternativa mais econômica.

O método pode ser expresso conforme segue:

$$\mathbf{IRR = r \text{ when } \{PW(M_o + U_o) - PW(M_a + U_a)\} = C_a} \quad \text{(Equação A4.4)}$$

where:
r = taxa em que os lados esquerdo e direito da equação são iguais.

A4.3.4 Técnica do valor líquido atual (NPV)

Esta técnica seleciona uma alternativa, dentre os projetos mutuamente exclusivos, que tenha o maior valor líquido atual. O custo inicial descontado de uma alternativa é subtraído da soma das economias anuais descontadas que a alternativa obterá em comparação com a facilidade existente. Todas as alternativas com benefícios que reflitam um valor líquido atual positivo são viáveis, enquanto a alternativa com o valor atual mais elevado é a mais vantajosa.

A técnica pode ser expressa como segue:

$$NPV = PW(M_o + U_o) - PW(M_a + U_a) - C_a \quad \text{(Equação A4.5)}$$

A4.4 Período de análise e valor final e residual das facilidades de transporte

O princípio do custo da oportunidade exclui a possibilidade de uma facilidade de transporte possuir um valor adicional sobre e acima do custo de oportunidade da reserva do seu terreno durante a sua vida de serviço, razão pela qual o investimento em facilidades de transporte é considerado como submerso (isto é, o desenvolvimento por si só possui uma aplicação alternativa possível). Por esta razão é desejável que o período de análise (avaliação) se estenda ao longo de toda a vida do projeto ou pelo período de vida planejado da facilidade. Contudo, existem razões práticas pelas quais o período de análise deve, algumas vezes, ser mais curto do que a vida de serviço planejada. Devido aos riscos / incertezas futuras, todas as projeções e previsões para períodos superiores a vinte anos são especulações devido, por exemplo, à dificuldade de prever volumes de tráfego futuros, divisão em modal, mudanças na tecnologia, uso do terreno, características demográficas, etc.

Os períodos para os quais são feitas previsões e projeções podem ser prorrogados além dos 20 anos desde que permaneçam confiáveis. No entanto, recomenda-se que os períodos de análise não ultrapassem 30 anos (normalmente é utilizado um período de análise de 20 anos), apesar de as soluções lógicas para certos problemas de transporte poderem ser projetos duráveis, com vidas de serviço muito mais longas do que 30 anos. Para ser justo (realista) com relação ao investimento em projetos duráveis, parte-se da regra pura, mas limitante do custo de oportunidade, introduzindo uma segunda regra da melhor avaliação conceitual na forma de um "valor residual". Este valor pretende representar um custo de oportunidade artificial de um projeto durante a sua vida de serviço e é amplamente, se não universalmente, aceito como uma convenção legítima e uma partida justificada a partir da regra do custo de oportunidade. Não fosse este o caso, muito poucos projetos de transporte duráveis seriam implementados por conta de um resultado de uma avaliação econômica.

Caso seja verificado que um projeto tem um valor final esperado (isto é, a regra da depreciação da facilidade ao final da sua vida de projeto) ou um valor residual (isto é, o valor da depreciação da facilidade durante a sua vida de projeto), tais valores seriam descontados e deduzidos do custo inicial descontado. A razão pela qual isso é feito é que um IRR e B / C são retornos ou rendimentos relativos ao custo do investimento. Por exemplo, se um projeto tem uma vida de projeto ou serviço de 30 anos e, após o término deste período, o terreno for novamente utilizado para a mesma atividade econômica como foi o caso antes do período de 30 anos, o custo do investimento inicial é igual ao custo de oportunidade do desenvolvimento da facilidade (isto é, planejamento direto, design e construção), mais o benefício que estiver sendo apropriado, mas não utilizando a sua reserva de terra em sua aplicação alternativa durante a vida de serviço. Em outras palavras, o custo do investimento em termos do qual o retorno ou rendimento é calculado é o custo de oportunidade, ligado ao desenvolvimento da facilidade, bem como o custo de oportunidade de utilização da terra para fins de transporte até aquele ponto em que a mesma for novamente liberada para uso alternativo.

Wirtgen GmbH
Reinhard-Wirtgen-Strasse 2 · 53578 Windhagen · Alemanha
Fone: +49 (0) 26 45/131-0 · Fax: +49 (0) 26 45/131-242
Internet: www.wirtgen.com · E-Mail: info@wirtgen.com

As ilustrações não implicam em obrigação. Detalhes técnicos sujeitos a modificação sem aviso.
Os dados de desempenho dependem das condições de operação. **No. 2311090** 49-50 PT - 08/12 © por Wirtgen GmbH 2012.
Impresso na Alemanha.